

Mars  
2019

---

# C@RUN

---

Séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation spatiale et potentiels d'atténuation du changement climatique

---

## COMPTE RENDU TECHNIQUE FINAL

ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

## REMERCIEMENTS

Le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) remercie le comité de pilotage du projet C@RUN pour sa contribution à la réalisation des travaux.  
En particulier ses membres :

Pour le CIRAD :

- Pierre Todoroff, Unité de Recherche Agroécologie et Intensification Durable des Cultures Annuelles (AïDA)
- Laurent Thuriès, Unité de Recherches Recyclage et Risque
- Emmanuel Tillard, Unité de Recherches Systèmes d'Elevages Méditerranéen et Tropicaux (SELMET)

Pour l'IRD :

- Alain Albrecht, Unité Mixte de Recherches Eco & Sols

Pour Tereos Océan Indien :

- Philippe Rondeau

Le CIRAD et ses partenaires remercient également le fonds européen FEDER et la Région Réunion qui ont cofinancé ce projet.



## CITATION DE CE RAPPORT

**Todoroff Pierre, Albrecht Alain, Allo Myriam, Thuriès Laurent, Tillard Emmanuel. 2019. C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique. CIRAD-IRD, 82 p.**

Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1360C0086

Étude réalisée par P. Todoroff, A. Albrecht, M. Allo, L. Thuriès et E. Tillard pour  
ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Pierre Todoroff  
Appel à projet de recherche : Reactif 2

Coordination technique - ADEME : PIERART Antoine  
Direction Productions et Energies Durables / Service Forêts, Alimentation, Bio-économie

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Cette étude constitue un exercice d'estimation du potentiel de séquestration de carbone dans les sols agricoles, dans un territoire extrêmement hétérogène du point de vue climatique, pédologique et agricole. L'objectif est d'évaluer les quantités de carbone du sol présentes actuellement dans les sols et de simuler l'impact de différents scénarios de changement d'usages des sols (cultures et pratiques culturales associées) sur ces stocks, afin d'offrir aux décideurs et aménageurs du territoire des références et des outils d'aide à la décision.

Le territoire étudié est l'île de La Réunion, qui présente une gamme de climats de tropical humide à semi-aride, un gradient de sols jeunes (andosols) à modérément évolués (sols ferralitiques) et des cultures tropicales (canne à sucre, fruitiers tropicaux, ananas) et tempérées (prairies, maraîchage).

Cet exemple est emblématique de nombreux pays tropicaux et extrapolable à certains DROM-COMs français.

La 1<sup>ère</sup> partie de cette étude a consisté à analyser l'importante base de données d'analyses de sol de La Réunion (plus de 45 000 analyses chimiques depuis plus de 20 ans, réparties sur tout le territoire cultivé). Des méthodes d'analyse spatiale et de fouilles de données ont ainsi mis en évidence 1- que le type de sol est le principal déterminant de la teneur en carbone des sols cultivés, devant les cultures (et pratiques associées), et la chimie du sol, 2- Une stabilité et une teneur très élevée des teneurs de carbone au cours des 20 dernières années sous culture de canne à sucre, notamment dans les sols les plus jeunes : jusqu'à 200 g de C pour 1000 g de sol (soit environ 300 t/ha sur les 30 premiers cm de profondeur) quand un sol sous forêt tempérée en contient 30 g (soit environ 80 tC/ha), et 3- une variabilité très élevée au sein de certains types de sol, qui n'est pas compatible dans certains cas avec la nature minéralogique du sol et les pratiques agricoles. Ce dernier résultat indique que la classification morphopédologique des sols de la Réunion actuellement en vigueur ne constitue pas un zonage du territoire par unités homogènes du point de vue du carbone du sol.

Nous avons choisi d'utiliser le calculateur de bilan de carbone Ex-ACT développé par la FAO pour évaluer l'impact des changements d'usages agricoles des sols sur les stocks de carbone. Les inventaires de GES (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, et CO<sub>2</sub>) étant réalisés sur des unités agro-pédo-climatiques homogènes du point de vue des paramètres intervenant dans le bilan carbone (climat, stocks de carbone du sol), nous avons procédé à une stratification du territoire en unités spatiales homogènes du point de vue des caractéristiques pédoclimatiques. Nous avons ainsi réalisé un zonage climatique selon les critères IPCC et avons redéfini une typologie des unités de sol représentative de la matière organique des sols et de leur minéralogie fondée sur la signature spectrale en moyen infrarouge des échantillons de sols de la pédothèque du laboratoire d'analyses de sols. Un regroupement des échantillons en groupes homogènes a été réalisé par l'algorithme K-means. Le zonage spatial correspondant a été obtenu après partitionnement du territoire en cellules de Voronoï autour de chaque échantillon et fusion de cellules appartenant au même groupe. Il est à noter que cette étape a pu être réalisée grâce à la richesse exceptionnelle de la pédothèque de La Réunion. Afin de déterminer le stock de carbone de chaque unité pédoclimatique et mode d'usage il nous faut connaître la densité apparente du sol. N'ayant pas les moyens humains pour mesurer la densité apparente de chaque unité par la méthode de prélèvement de sol au cylindre, nous avons développé une méthode d'estimation du stock de carbone du sol à partir de sa signature spectrale. Nous avons ainsi développé des modèles de prédiction de la teneur en carbone, de la densité apparente et des stocks de carbone en spectroscopie proche infrarouge et spectroscopie moyen infrarouge, établies à partir d'une centaine d'échantillons extraits de carottes de sol réalisées grâce à un carottier motorisé à percussion sur 11 sites dans des situations contrastées et représentatives des unités pédoclimatiques. La précision de chacun des modèles est extrêmement satisfaisante et surprenante. Des analyses complémentaires des composants (Si, Al, Fe) des minéraux amorphes nanocristallins présent dans les andosols (allophanes) montrent que les spectres infrarouges (en proche ou en moyen infrarouge) sont très sensibles à la présence de ces derniers. Or ceux-ci confèrent au sol une très grande surface spécifique, allant de pair avec une forte capacité d'adsorption de la matière organique sous forme de complexes organo-minéraux stables. Les minéraux amorphes constituent donc bien un proxy de la densité apparente des sols volcaniques de La Réunion qui peut varier de 0.4 dans des andosols perhydratés à 1.2 dans des sols ferralitiques. C'est ainsi grâce à la présence des minéraux amorphes, quantifiables par spectroscopie infrarouge, et la grande quantité d'échantillons de sols conservés dans la pédothèque de la Réunion que nous avons pu estimer les stocks de carbone des unités de sol selon divers modes d'usage.

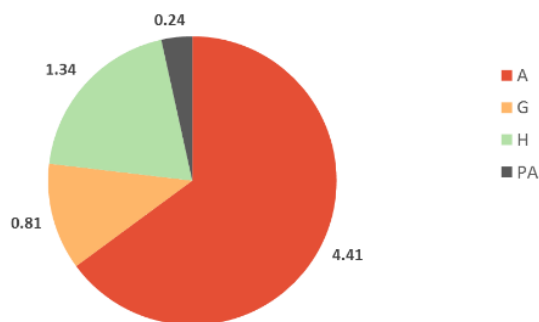
La variabilité des stocks de carbone, inhérente à la variabilité locale des propriétés des sols, est néanmoins encore forte au sein de chaque unité pédoclimatique. Nous avons estimé les différences de stocks de carbone entre modes d'usage, nécessaires au paramétrage du calculateur Ex-ACT, par une approche spatiale consistant à comparer les stocks entre la référence (la canne à sucre) et les autres usages, dans un voisinage de 200m autour de chaque point de référence.



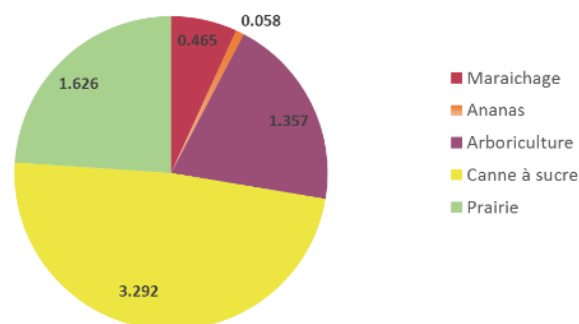
Les 500 couples canne à sucre – autres usages ainsi sélectionnés montrent que les sols riches en allophanes ont des stocks de carbone du sol supérieur à 150 MgC ha<sup>-1</sup> alors que le stock est deux fois moindre pour les sols à halloysite. De manière globale mais significative, les modes d'usage autres que canne à sucre montrent des stocks de carbone organique nettement inférieurs à ceux de la référence (jusqu'à plus de 40 %). Toutefois des systèmes prairiaux permettent une augmentation significative du stock de carbone de près de 25 %, pour une seule unité pédoclimatique. La moyenne du déstockage est de 30 MgC ha<sup>-1</sup> (17 à 46% du stock de la référence).

Les stocks de carbone du sol et les surfaces correspondantes connues, la quantité totale de carbone du sol a pu être calculée par unité pédologique et mode d'usage. Au total, les sols agricoles de La Réunion renferment un stock de 6.8 millions de tonnes de carbone sur 0-30cm de profondeur pour une surface de 47 585 ha.

Quantités de carbone (10<sup>6</sup> MgC) par unité pédologique simplifiée



Quantités de carbone (10<sup>6</sup> MgC) par mode d'usage



Le carbone contenu dans les trente premiers centimètres des andosols (A1, A2, AA, AG) représente 65 % du carbone des sols et 48 % des surfaces du terroir agricole. Les sols à halloysite représentent l'autre part importante du carbone du sol (23%) sur 20% des surfaces agricoles tandis que les sols à gibbsite (GA, GH) représentent 13% de la quantité de carbone du sol pour 14% des surfaces.

La canne à sucre, base du système agricole réunionnais, 54% du territoire selon les données d'occupation du sol issues de la télédétection, représente près de la moitié de la quantité totale de carbone du terroir agricole (48%). Quant aux prairies, elles stockent 24% du carbone pour seulement 15% de la surface agricole.

Le calculateur Ex-ACT permettant d'estimer le bilan carbone de projets agricoles et/ou forestiers a été paramétré avec des valeurs de niveau Tier 2 issues des résultats de la 1ère partie de l'étude (stocks et variations de stock de carbone) ainsi que de données issues de la littérature lorsqu'elles étaient disponibles. Les bilans ont été évalués entre la situation actuelle et des scénarios plausibles de changements d'usages des sols plausibles ou extrêmes, afin de fournir aux décideurs des références d'impact sur les stocks de carbone. L'exercice montre que l'outil semble adapté à l'évaluation des bilans GES pour un petit territoire comme La Réunion où la diversité des sols, des climats, des usages est importante, à condition de renseigner les facteurs d'émission avec des valeurs de niveau Tier 2. Le total annuel d'émissions de GES de 276 879 tCO<sub>2</sub>eq. Les résultats comparatifs entre une approche globale et une approche spatiale montrent par ailleurs l'intérêt du découpage du territoire selon ses caractéristiques pédoclimatiques.

En outre l'outil Ex-Act permet de décrypter aisément les sources des émissions de GES en détaillant les compartiments (les changements d'usages qui affectent le carbone de la biomasse et du sol, l'arboriculture qui est un puits de carbone par sa composante de biomasse ligneuse et les intrants qui déterminent les émissions de N<sub>2</sub>O) dont résulte le bilan d'émission de GES des différents scénarios de changements d'usages. Trois des scénarios proposés sont « sources de carbone » en raison, majoritairement, d'une augmentation des surfaces de maraîchage, ananas au détriment de la canne à sucre. Quant aux scénarios « puits de carbone », trois facteurs peuvent expliquer ces résultats : la diminution des intrants dans le scénario 'augmentation des surfaces en prairies', 'augmentation des surfaces d'arboriculture', et la monoculture en canne à sucre.

Néanmoins les émissions de GES estimées avec Ex-Act restent à prendre avec précaution car certaines sources d'émissions ne sont pas prises en compte, en particulier celles liées à l'alimentation animale importée, aux machines agricoles, aux émissions amonts des carburants, ni des émissions liées à l'apport d'azote dans les résidus de culture.

## CONTRIBUTEURS

Section	Organisme	Auteur
1. Contexte et enjeux de l'étude	CIRAD IRD	Pierre Todoroff Alain Albrecht
2. Rappel sur l'organisation du projet et la démarche	CIRAD IRD	Pierre Todoroff Alain Albrecht
3. Réalisations		
3.1. Cartographie des teneurs en carbone du sol dans les systèmes agricoles de La Réunion	CIRAD  IRD	Pierre Todoroff Fabien Gogé Magali Jameux Alain Albrecht
3.2. Stratification du territoire	CIRAD/ADEME CIRAD IRD	Myriam Allo Pierre Todoroff Alain Albrecht
3.3. Méthodologie d'évaluation des stocks de carbone du sol	IRD  CIRAD	Alain Albrecht Kenji Fujisaki Pierre Todoroff Myriam Allo
3.4. Facteurs d'émission de GES in situ	CIRAD	Emmanuel Tillard Laurent Thuriès
3.5. Changements d'usages & bilans GES	CIRAD/ADEME CIRAD IRD	Myriam Allo Pierre Todoroff Alain Albrecht Kenji Fujisaki Thiphaine Chevallier
4. Conclusions et perspectives	CIRAD/ADEME CIRAD IRD	Myriam Allo Pierre Todoroff Alain Albrecht



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution de la teneur en carbone moyenne des sols agricoles de La Réunion.....	10
Figure 2 : Diagramme opérationnel du projet C@RUN .....	13
Figure 3 : Localisation des échantillons de sols prélevés entre 1993 et 2017 .....	14
Figure 4 : Nombre d'échantillons prélevés par année et par cultures .....	14
Figure 5 : Nombre d'échantillons prélevés par année et par type de sol .....	15
Figure 6 : Localisation des analyses de sols retenues et des types de cultures .....	16
Figure 7 : Cartographie de la teneur en carbone du sol moyenne par ilot cultural .....	17
Figure 8 : Carte morphopédologique simplifiée .....	17
Figure 9 : Indice d'importance des prédicteurs dans le modèle BRT .....	18
Figure 10 : Variabilité de la teneur en carbone sous canne à sucre par domaine pédogénétique (codification STIPA).....	19
Figure 11 : Variabilité de la teneur en Csol mesurée dans une unité pédologique 42AB Fond de carte : Bing © Microsoft 2018, © CNES 2018.....	20
Figure 12 :Schéma de classification des régions climatiques définies par l'IPCC .....	21
Figure 13 : Zones climatiques IPCC .....	21
Figure 14 : Carte des teneurs en carbone des 974 échantillons de sol avec un spectre MIR .....	22
Figure 15 : Exemple de spectre moyen infra-rouge.....	23
Figure 16 : Analyse en composantes principales des spectres MIR d'échantillons de sol .....	24
Figure 17 : Partitionnement de l'espace en cellules de Voronoï.....	24
Figure 18 : Carte d'unités pédologiques homogènes .....	25
Figure 19 : Teneurs de carbone mesurées (a) et teneurs en allophanes prédites (b) des 974 échantillons de sol par cluster.....	25
Figure 20 : Spectres moyens des 11 clusters de sol et identification des bandes d'absorption correspondant aux minéraux présents dans les sols de La Réunion .....	26
Figure 21 : Carte des unités pédoclimatiques .....	27
Figure 22 : Spectroscope ASD LabSpec 5000 .....	28
Figure 23 : Spectroscope moyen infrarouge (FTIR 4300 Agilent) .....	28
Figure 24 : Comparaison des prédictions par spectroscopie MIR et des mesures de laboratoire et de terrain.....	29
Figure 25 : Prédiction de la Da des sols andiques à partir de la teneur des composants des minéraux amorphes (modèle de prédiction de type PLSR) .....	29
Figure 26 : Carte de la localisation des sites de comparaison de stock.....	30
Figure 27 : Stock de carbone du sol (MgC ha-1) selon le type de sol et son usage .....	31
Figure 28 : Modalités du choix des échantillons pour comparaison de stocks de carbone du sol selon usage des terres, à partir de base d'analyses de sol (géoréférencées).....	32
Figure 29 : Stocks de carbone du sol (MgC ha-1) sous culture de canne à sucre, extraits de la base de données pour la couche 0-30 cm (la valeur entre parenthèses correspond au nombre de buffers).....	33
Figure 30 : Moyenne des différences de stock de Csol (MgC ha-1) selon climat et type de sols, tous changements d'usages confondus (la valeur entre parenthèses correspond au nombre de buffers) .....	34
Figure 31 : Carte des teneurs en carbone .....	35
Figure 32 : Carte des stocks de carbone .....	36
Figure 33 : Carte d'occupation du sol .....	39
Figure 34 : Carte des stocks de carbone des sols agricoles de La Réunion.....	39
Figure 35 : Répartition des quantités de carbone (MgC) et des surfaces par unité pédologique .....	40

Figure 36 : Répartition des quantités de carbone (MgC) et des surfaces par mode d'usage .....	40
Figure 37 : Répartition des quantités de carbone (MgC) (8a et 8b) et des surfaces (8c et 8d) par mode d'usage pour chaque unité pédologique.....	41
Figure 38 : Carte des stocks de carbone des sols agricoles de La Réunion à différentes échelles spatiales ...	42
Figure 39 : Schéma de chambre statique .....	44
Figure 40 : Dispositif expérimental de mesure des GES (en vert foncé).....	45
Figure 41 : Calendrier des prélèvements à chaque campagne de mesure .....	46
Figure 42 : Plan partiel du dispositif : les 3 blocs (sur 5) sur lesquels sont mesurées les émissions de GES pour les 3 modalités de fertilisations (sur 6) T, LP et BA .....	47
Figure 43 : Dispositif d'évaluation de l'hétérogénéité spatiale des émissions de GES (à gauche). Rangs de canne en vert, positions des embases et cloches de prélèvement d'échantillons d'atmosphère en rouge .....	47
Figure 44 : Dispositif d'évaluation de l'hétérogénéité spatiale des émissions de GES sur andosol (à gauche). Rangs de canne en vert, positions des embases et cloches de prélèvement d'échantillons d'atmosphère en rouge .....	48
Figure 45 : Emissions de CO <sub>2</sub> mesurées avant, à l'épandage et après épandage (moyennes de 3 parcelles par traitement) .....	48
Figure 46 : Emissions de N <sub>2</sub> O mesurées avant, à l'épandage et après épandage (moyennes de 3 parcelles par traitement) .....	49
Figure 47 : Flux de CO <sub>2</sub> et N <sub>2</sub> O (détails haut droite et bas droite) sur Andosol pour 2 modalités (lisier de porc et urée), mesurés à l'aide de 18 enceintes par modalité. Les précipitations figurent en vert.....	50
Figure 48 : Différents types de dispositifs utilisés depuis 2015 pour mesurer les émissions de CO <sub>2</sub> et N <sub>2</sub> O (ici sur Nitisol) : enceintes individuelles (à gauche 1 par parcelle ; au centre 6 par parcelle ; à droite 18 par parcelle) et chambres de mesures automatiques (à droite et à gauche, 3 par parcelles).....	51
Figure 49 : Démarche globale de l'utilisation du calculateur EX-ACT au sein d'une unité pédoclimatique homogène pour l'évaluation du bilan C lié aux changements d'usage des terres à la Réunion .....	53
Figure 50 : Emissions annuelles de GES du secteur agricole de La Réunion selon différentes sources et méthodes comparées à l'évaluation produite par le Projet C@RUN.....	53
Figure 51 : Bilans des émissions de GES par hectare et par an des différents scénarios de changements d'usages.....	55
Figure 52 : Bilans des émissions de GES par scénario et par composante pour l'ensemble des 13 pédoclimats .....	55
Figure 53 : Bilan annuel total des émissions de GES et détaillé par composante pour les 13 pédoclimats selon les méthodes « Spatial » et « Global » dans la configuration actuelle des usages des terres.....	56
Figure 54 : Bilans annuel total des émissions de GES par scénario selon les méthodes «Spatiale» et «Globale» .....	57
Figure 55 : Bilans annuels par ha des émissions de GES par scénario selon les méthodes «Spatiale» et «Globale» .....	58
Figure 56 : Unités pédoclimatiques utilisées dans les simulations .....	70





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales variables descriptives des analyses de sol .....	15
Tableau 2 : Statistiques prédictives de modèle BRT .....	18
Tableau 3 : Statistiques descriptives des 974 analyses de sol .....	22
Tableau 4 : Performance des modèles de prédiction MIR des composants des minéraux amorphes .....	29
Tableau 5 : Caractéristiques des pratiques des parcelles maraichères (MAR) et sous cultures d'ananas (ANA) étudiées pour la comparaison des stocks de carbone du sol, avec des parcelles contiguës en culture de canne à sucre.....	31
Tableau 6 : Stocks de Csol (0-30 cm).....	33
Tableau 7 : Teneurs, stocks et quantités de carbone par unité pédologique et mode d'usage à partir des 10000 points de la base de d'analyses de sol .....	37
Tableau 8 : Moyennes des teneurs, stocks et quantités de carbone par mode d'usage .....	38
Tableau 9 : Masse de carbone du sol (en MgC) selon le type de sol et surface des sols .....	40
Tableau 10: Masse de carbone du sol (en MgC) selon le mode d'usage et surface des modes d'usage .....	41
Tableau 11 : Caractéristiques des sites de mesures d'émission de GES .....	44
Tableau 12 : Détail des différents traitements de l'essai fertilisation ; en gras les modalités utilisées pour la mesure des émissions de GES.....	44
Tableau 13 : Calendrier des campagnes de mesures de GES .....	46



# SOMMAIRE

1. Contexte et enjeux de l'étude .....	10
1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux.....	10
1.2. Positionnement du projet .....	11
2. Rappel sur l'organisation du projet et la démarche .....	12
3. Réalisations.....	13
3.1. Cartographie des teneurs en carbone du sol dans les systèmes agricoles de La Réunion .....	13
3.1.1. Analyse globale .....	14
3.1.2. Analyse spatiale et identification des déterminants du carbone du sol .....	16
3.2. Stratification du territoire .....	20
3.2.1. Zonage climatique .....	20
3.2.2. Zonage pédologique .....	22
3.2.3. Unités pédoclimatiques .....	26
3.3. Méthodologie d'évaluation des stocks de carbone du sol.....	27
3.3.1. Des teneurs aux stocks : évaluation de la densité apparente .....	27
3.3.2. Les stocks de carbone du sol selon les modes d'usages et les types de sol : mesures et évaluation à partir de données extraites de la base de données .....	30
3.3.3. Les stocks de carbone du sol : prédictions et spatialisation .....	34
3.4. Facteurs d'émission de GES in situ .....	42
3.4.1. Objectif .....	42
3.4.2. Matériel et méthodes.....	43
3.4.3. Résultats des mesures.....	48
3.4.4. Conclusion et perspectives .....	51
3.5. Changements d'usages & bilans GES .....	51
3.5.1. Méthode .....	52
3.5.2. Simulations.....	53
3.5.3. Conclusion.....	58
4. Perspectives.....	59
Bibliographie .....	60
Liste des publications du projet.....	62
Annexe 1 : Les différentes classifications de sol utilisées .....	63
Annexe 2 : Modèles de prédiction du stock de carbone du sol en spectroscopie infrarouge.....	64
Annexe 3 : Exemple de calendrier de prélèvements (2 <sup>ème</sup> campagne, sur nitisol) .....	65
Annexe 4 : Exemple de calendrier de prélèvements (3 <sup>ème</sup> campagne, sur andosol).....	66
Annexe 5 : Optimisation des temps de prélèvements (effectués à 2 personnes, pour une parcelle instrumentée avec 18 enceintes) .....	67
Annexe 6 : Stocks et différences de stocks de carbone du sol selon les modes d'usages autre que canne à sucre pour l'ensemble des unités pédoclimatiques .....	68
Annexe 7 : Paramétrage du calculateur Ex-ACT .....	70



# 1. Contexte et enjeux de l'étude

## 1.1. Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

Les émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) ont augmenté de 1,4 % en 2012 ; sa concentration dans l'atmosphère a dépassé, le 9 mai 2013, la valeur 'symbolique' de 400 ppm, mesurée à l'observatoire de Mauna Loa, Iles Hawaiï.

Dans le but de limiter les changements climatiques dus aux émissions de GES, la convention cadre des nations unies sur le changement climatique et son protocole de Kyoto vise à stabiliser voire réduire les émissions de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Une des options pour y parvenir est la séquestration du carbone dans les sols. Cette solution n'a pas pour seul avantage de réduire les émissions mais aussi de stocker de la matière organique dans le sol produisant des bénéfices pour l'agriculture.

De nombreuses études ont montré l'impact de facteurs environnementaux et de pratiques culturales sur le stockage du carbone dans les sols (Bernoux et al., 2002, 2006, Cerri et al., 2006, Grinand et al., 2009, 2012, Meersmans et al., 2012, Ramarson et al., 2011). La valorisation de la fonction puits de carbone des agrosystèmes est ainsi toujours d'une actualité cruciale pour la mise en œuvre des politiques de lutte contre le changement climatique. Ou, plus généralement, la connaissance précise des bilans GES des systèmes agricoles participe à la décision sur les pratiques à mettre en œuvre dans les politiques environnementales en matière de climat.

Si, en France métropolitaine, les données sur les bilans GES des systèmes agricoles sont nombreuses, les régions ultra-marines françaises restent moins documentées ; c'est, en effet, le cas de l'île de La Réunion (Basile-Doelsch et al., 2009).

Récemment, l'agriculture réunionnaise fut sollicitée pour définir, sa contribution sur les grands enjeux du développement durable de la Réunion : application des grandes directives européennes et la loi Grenelle II de l'Environnement, contribution à l'autonomie énergétique de l'île, nécessité d'une adaptation face aux perspectives d'évolution des "soutiens", aides publiques apportées actuellement par l'Etat et l'UE.

Pour construire leur stratégie, en intégrant notamment les exigences de lutte contre le réchauffement climatique, les acteurs du monde agricole doivent disposer de références et d'outils de calcul des impacts des activités agricoles sur les émissions de GES et le stockage du carbone (dans les sols et les productions agricoles).

Cette question devient d'autant plus prégnante qu'une première analyse statistique des données existantes montre que les teneurs en carbone des sols agricoles réunionnais ont chuté de plus de 30% ces 10 dernières années, passant d'une moyenne de 4.6 à 3.2 g/kg (Figure 1).

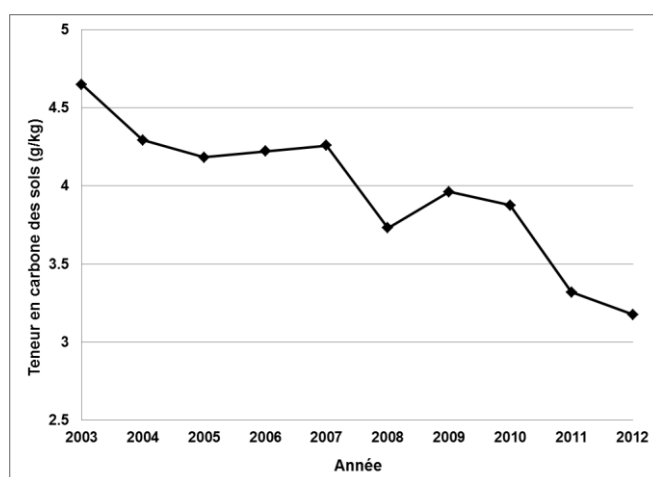


Figure 1 : Evolution de la teneur en carbone moyenne des sols agricoles de La Réunion

A La Réunion, département d'outre-mer, l'agriculture reste le principal pilier de l'économie. La culture de la canne à sucre est la 1<sup>ère</sup> production agricole de La Réunion. Elle occupe près de 60% de sa SAU et réalise les 2/3 des exportations de l'île. Elle génère directement ou indirectement 15 000 emplois, assure 30 % des revenus des agriculteurs et produit 25 % de l'électricité consommée. Les activités d'élevage pour leur part occupent 26% de la SAU pour la production de fourrages des ruminants. Leur chiffre d'affaire avoisine le produit brut de la filière canne. En outre les prairies (incluses dans l'article 3.4 du protocole de Kyoto) représentent un grand réservoir potentiel de carbone. Les cultures de maraîchage, si elles n'occupent que 1% de la SAU à la Réunion, représentent souvent un cas défavorable de gestion du carbone (peu ou pas d'apport de C, forte minéralisation).

Des références sont donc particulièrement utiles pour quantifier leur impact dans les régions à forte activité maraîchère.

Ces trois productions couvrent plus des ¾ des surfaces cultivées et représentent donc le principal levier d'une politique de stockage du carbone dans les sols agricoles.

La proposition C@RUN constituera un projet visant à développer (1) des connaissances nouvelles, à différentes échelles spatiales et temporelles, des stocks de carbone dans les sols agricoles sous cultures annuelles démontrant, ou non, leurs fonctions puits selon les systèmes étudiés, et (2) des outils de calcul simples et accessibles à tous.

## 1.2. Positionnement du projet

Le sol sera l'objet d'étude central du projet. Il est ainsi actuellement admis de manière univoque que le caractère non renouvelable du patrimoine « sol », à l'échelle des générations humaines, impose de préserver les sols et les services écosystémiques qu'ils rendent, tels que la production alimentaire et de biomasse, la régulation et le filtrage des eaux, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, la conservation de la biodiversité. Pour répondre à ces enjeux, il convient donc de mettre en place une agriculture qui fait la promotion de systèmes de production alternatifs centrés sur une gestion optimale des matières organiques et donc du carbone organique du sol (COS). Ces pratiques agricoles, et les transformations nécessaires de l'agriculture, comme étant « une agriculture qui accroît durablement la productivité et la résilience (adaptation), réduit/élimine les GES (atténuation) tout en promouvant la réalisation de la sécurité alimentaire nationale et les objectifs de développement » (FAO, 2010). De nombreux organismes nationaux et internationaux reprennent aujourd'hui ce concept, nommé « Climate-Smart Agriculture ».

De plus, Le carbone organique du sol (COS) est, et devient de plus en plus, un indicateur, pour la communauté scientifique internationale traitant de développement agricole durable et d'atténuation des changements climatiques. Par exemple, Le projet européen « ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring » (ENVASSO) a proposé le COS comme l'un des 16 indicateurs principaux, parmi 290 indicateurs potentiels, pour la mise en place d'un système de surveillance des sols au niveau européen. Plus récemment, à l'échelle mondiale, le COS a également été retenu par le Partenariat Mondial sur la Bioénergie (Global Bioenergy Partnership, GBEP). Fin décembre 2011, le GPEB a proposé une série de 24 indicateurs destinés à éclairer le processus décisionnel et de faciliter le développement durable de la bioénergie. Le COS est la variable centrale retenue pour exprimer la « qualité des sols », l'un des huit indicateurs retenus pour le pilier environnemental.

Le COS est actuellement un des enjeux globaux les plus importants, comme le montre de manière symptomatique le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) dans sa dernière édition Geo-Year-Book qui ne retient que deux sujets jugés majeurs : « Les avantages du carbone du sol » et « la fermeture et le démantèlement des réacteurs nucléaires » !

Le sol est le compartiment important de stockage (le carbone du sol, 'puits' de CO<sub>2</sub>) mais aussi d'émission de GES (N<sub>2</sub>O essentiellement) dans les systèmes agricoles à cultures annuelles. Cette proposition (C@RUN) a pour objectif d'évaluer la capacité de stockage du COS des sols agricoles réunionnais et de l'impact des changements d'usage des terres sur les fonctions source/puits de GES des sols. Elle apportera des données, nouvelles et extrêmement précises grâce, entre autres, à la valorisation de données (BD sols cannières depuis 1993) et outils existants (SmartIS).

Différents outils sont maintenant disponibles pour permettre aux décideurs et aux porteurs de projets d'y intégrer la dimension « carbone » comme, par exemple les analyses de cycle de vie (ACV) utilisées dans l'analyse des filières. Mais actuellement, la dimension spatiale s'impose de plus en plus : en effet, une activité dans une région du monde peut avoir des conséquences directes, voire indirectes, sur les dynamiques des changements d'usage du sol, parfois même bien au-delà de la région concernée (les changements indirects d'usage des terres). Aujourd'hui, seulement quelques d'outils prennent en compte cette dimension spatiale dans les bilans carbone des secteurs agricoles et forestiers. Très récemment, une revue des outils d'aide à la décision à l'échelle régionale a été publiée (Colomb et al., 2013). Ces outils sont des calculateurs, c'est-à-dire des outils de calculs en ligne, sous Excel ou sous un autre format informatique qui permette d'évaluer les émissions de carbone des secteurs agricole et forestier. Ces calculateurs sont des outils d'aide à la décision « faciles d'utilisation » pour les acteurs de terrain par opposition aux modèles, plus complexes, et plus adaptés au monde de la recherche. Mais force est de constater que ces outils sont très souvent basés sur des coefficients et données génériques qui ne correspondent pas toujours aux contextes locaux. Il est donc nécessaire de développer des données et coefficients propres à chaque contexte particulier afin, notamment, de réduire les incertitudes. La convention cadre des nations unies sur le changement climatique et son protocole de Kyoto vise à stabiliser, voire réduire les émissions de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique, dans le but de limiter les changements climatiques dus aux émissions de GES. Une des options pour y parvenir est la séquestration du carbone dans les sols. Cette solution n'a pas pour seul avantage de réduire les émissions mais aussi de stocker de la matière organique dans le sol produisant des bénéfices pour l'agriculture. C'est ce que veut promouvoir l'initiative 4 pour 1000.

Si, en France métropolitaine, les données sur les bilans GES des systèmes agricoles sont nombreuses, les régions ultra-marines françaises restent moins documentées ; c'est, en effet, le cas de l'île de La Réunion.



Le projet C@RUN a pour ambition de combler ces lacunes en (1) renseignant les bilans GES et, tout particulièrement, les stocks de carbone des sols agricoles réunionnais, (2) qualifiant/hiérarchisant les déterminants (naturels et anthropiques) du stockage du carbone dans ces sols, et (3), en développant des outils (modélisation, calculateurs) nécessaires à la prise de décision en termes d'atténuation par les acteurs du développement agricole réunionnais.

A ces fins, deux outils existants, une importante base de données d'analyses de sols sous culture de canne à sucre (42000 échantillons de sols de la Réunion, depuis 1993 jusqu'à aujourd'hui) et le système d'information (SI) agricole SmartIS seront utilisés et adaptés aux objectifs du projet.

## 2. Rappel sur l'organisation du projet et la démarche

Le projet, d'une durée de 3 ans, est constitué de 5 tâches de recherches spécifiques (hors la tâche #1 de coordination) correspondant aux grandes étapes nécessaires au développement d'un outil spatialisé de bilan de carbone des sols et des facteurs d'émission de GES adapté au contexte agricole tropical de La Réunion.

La tâche #2 s'attachera à hiérarchiser les déterminants de la dynamique du stockage du carbone ainsi que leur distribution géographique à partir de sites-parcelles les plus pertinents, par une approche en fouille de données dans la base ASAR.

La base ne contenant que des données en concentration du carbone du sol, une importante campagne de mesure de la densité apparente s'avère nécessaire afin de pouvoir traduire les teneurs en stocks en carbone de ces sols volcaniques, très différents d'un point de vue minéralogique selon leur localisation (altitude, âge des dépôts). C'est l'objet de la tâche #3. Ce sera aussi l'occasion de construire des modèles de prédiction des teneurs en Csol à partir des outils de la spectroscopie infra-rouge, en complément de ceux existant actuellement tous sols confondus sans référence aux systèmes et pratiques culturales (Thuriès et al., 2013).

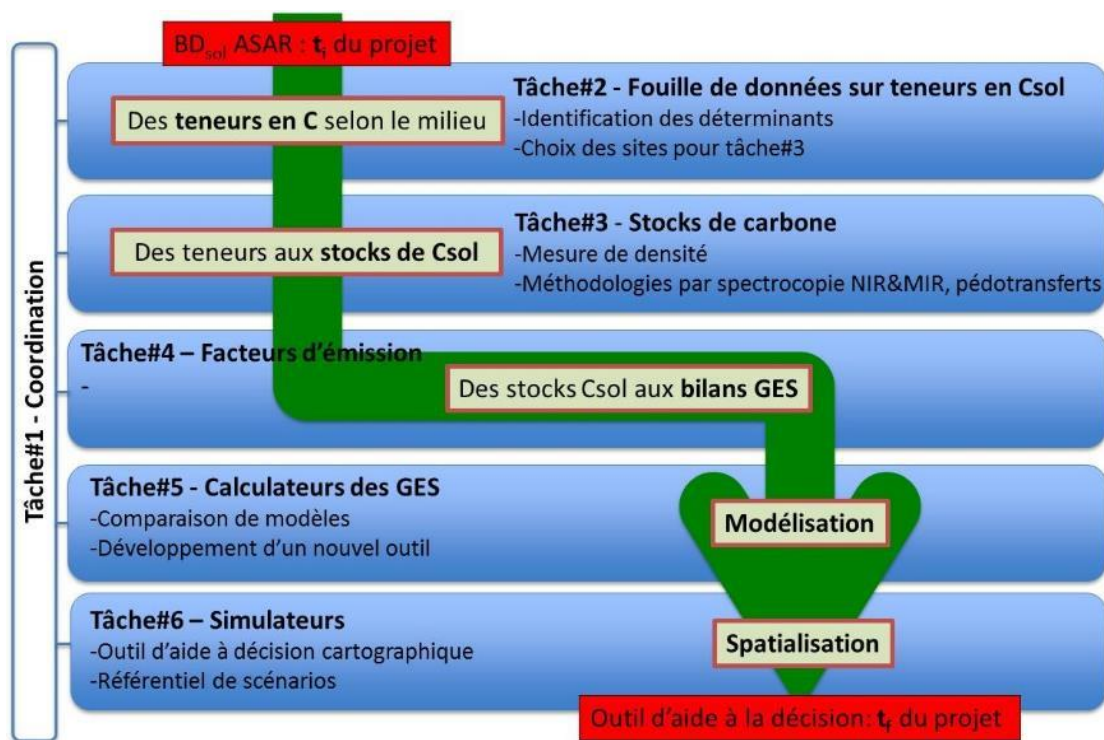
La tâche #4 réalisera le passage des stocks de C des sols au bilan de GES. L'élaboration des bilans de GES des pratiques et systèmes étudiés nécessite l'utilisation de facteurs d'émissions des GES. Les valeurs proposées par l'IPCC (tier 1) (IPCC) seront utilisées, mais induisant une forte incertitude : aussi, pour certaines pratiques (apport de fertilisants organiques vs minéraux) et systèmes (prairies de fauche, canne à sucre en repousse ou après plantation), des études complémentaires seront mises en place afin de préciser ces valeurs, dans le milieu réunionnais.

La tâche #5 mettra en œuvre un calculateur de bilan carbone pour estimer les stocks et variations de stocks de carbone du sol dans le cas de changement d'usages des terres.

Toutes les informations nécessaires aux modèles (de stock de Csol, émission de GES) sont (climat, type de sol, teneurs en C, occupation du sol), ou seront (densité apparente, pratiques) grâce aux tâches prévues dans ce projet (tâches #2 et #3), géolocalisées et stockées dans le SI SmartIS. Elles seront dans la mesure du possible mesurées ou estimées sur l'ensemble du territoire cultivé de l'île de la Réunion.

Les modèles communiqueront avec ce SI pour échanger les données (d'entrée et de sortie) et pourront ainsi être spatialisés sur l'ensemble du territoire renseigné. Ils bénéficieront de l'outil de webmapping de SmartIS comme support de restitution des résultats sous forme de cartes. Certaines de ces cartes constitueront un référentiel de l'impact des pratiques agricoles sur le carbone des sols et des GES à La Réunion.

La Figure 2 présente l'organisation des tâches du projet et les sous-tâches principales.



**Figure 2 : Diagramme opérationnel du projet C@RUN**

La coordination du projet est assurée par le CIRAD (Unité de Recherche AIDA « Agroécologie et Intensification Durable des cultures Annuelles ») et fait l'objet d'une tâche à part entière (tâche 1). Elle s'appuie sur un comité de pilotage, constitué des responsables de tâches. Ce comité a pour mission de prendre les décisions concernant le fonctionnement du projet lorsque celles-ci touchent plus d'une des équipes. Il décide notamment du calendrier des rencontres et de la gestion des ressources humaines et matérielles. Il a aussi pour mission de suivre l'avancée des travaux.

La tâche 2 est réalisée par l'UR AIDA, plus particulièrement par son équipe de modélisation et information spatiale (P. Todoroff, F. Gogé, M. Allo, L. Paulin, M. Mézino, L. Le Mézo) et par l'IRD (UMR Eco&Sols « Ecologie fonctionnelle & Biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes », A. Albrecht ; K. Fujisaki, T. Chevallier).

La tâche 3 a été conduite par l'UMR Eco&Sols avec l'appui de l'UR AIDA.

La tâche 4 a été réalisée par l'Unité de Recherche Recyclage et Risque (L. Thuriès, D. Baret, G. Moussard) et l'UMR SELMET (« Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux », E. Tillard, S. Nabeneza, E. Rivière).

Les tâches 5 et 6 ont été pilotées et réalisées par l'UR AIDA avec l'appui de l'UMR Eco&Sols.

### 3. Réalisations

#### 3.1. Cartographie des teneurs en carbone du sol dans les systèmes agricoles de La Réunion

La tâche 2 a pour objectifs, à partir de l'importante base d'analyses de sol sous différents systèmes de cultures (canne à sucre, prairie fourragères et maraîchage), de :

- 1- Décrire et cartographier l'évolution des teneurs en carbone des sols à différentes échelles spatio-temporelles de l'île de la Réunion,
- 2- Identifier et quantifier l'influence des facteurs environnementaux (pédologie, climat, topographie, etc.) et/ou des pratiques culturales, qui déterminent la dynamique des teneurs en carbone des sols par des méthodes de fouille de données.



### 3.1.1. Analyse globale

La base de données d'analyses des sols de la Réunion contient 46000 échantillons géoréférencés de sols prélevés entre 1993 et 2017 dans différents systèmes de culture : canne à sucre, prairie, maraichage, arboriculture, etc. (Figure 3). Dans le cadre de cette étude, dont l'objectif est de quantifier l'impact des usages et changements d'usages des sols agricoles, nous avons retenu les 5 grands types d'usages suivants qui nous paraissent regrouper des pratiques similaires du point de vue de leur un impact sur le cycle du carbone : canne à sucre, prairie, maraichage de cycle long (ananas), maraichage de cycle court (légumes), et arboriculture (Figure 4). 80% des sols analysés proviennent de la canne à sucre. Ce grand nombre d'analyses de sols sous canne à sucre est la conséquence de l'apparition du plan de soutien de l'Etat à la replantation de la canne dans les années 90. En effet, pour obtenir ces subventions, les planteurs doivent déclarer et localiser la, ou les, parcelle(s) à replanter (contour GPS, informations techniques et administratives). Une analyse de sol de la parcelle à replanter est également obligatoire. Le prélèvement est fait par un technicien du Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre (CTICS) et envoyé au laboratoire du CIRAD accrédité ISO17025.

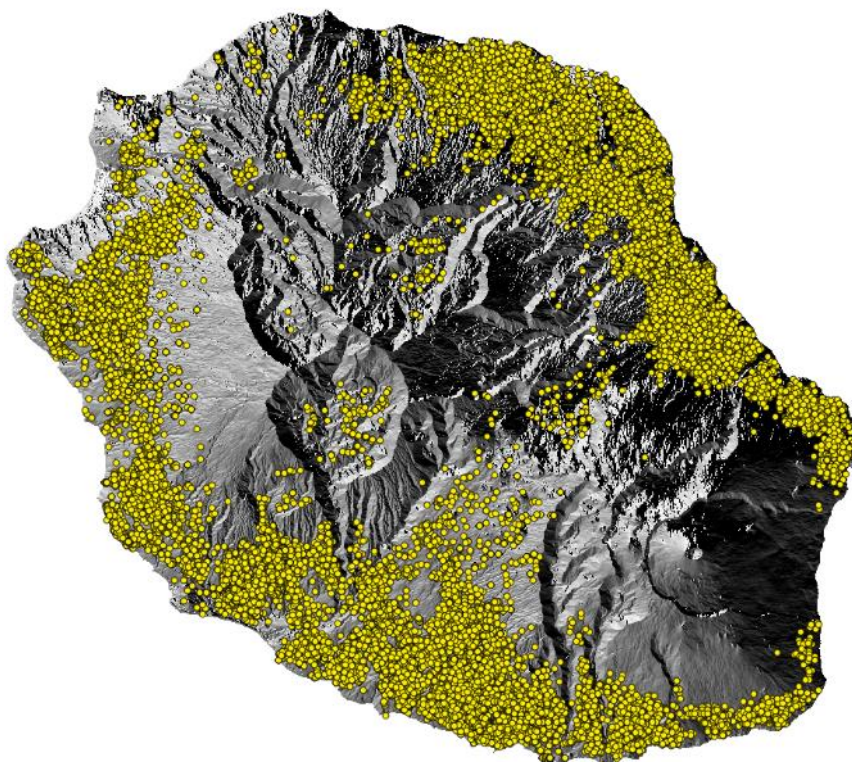


Figure 3 : Localisation des échantillons de sols prélevés entre 1993 et 2017

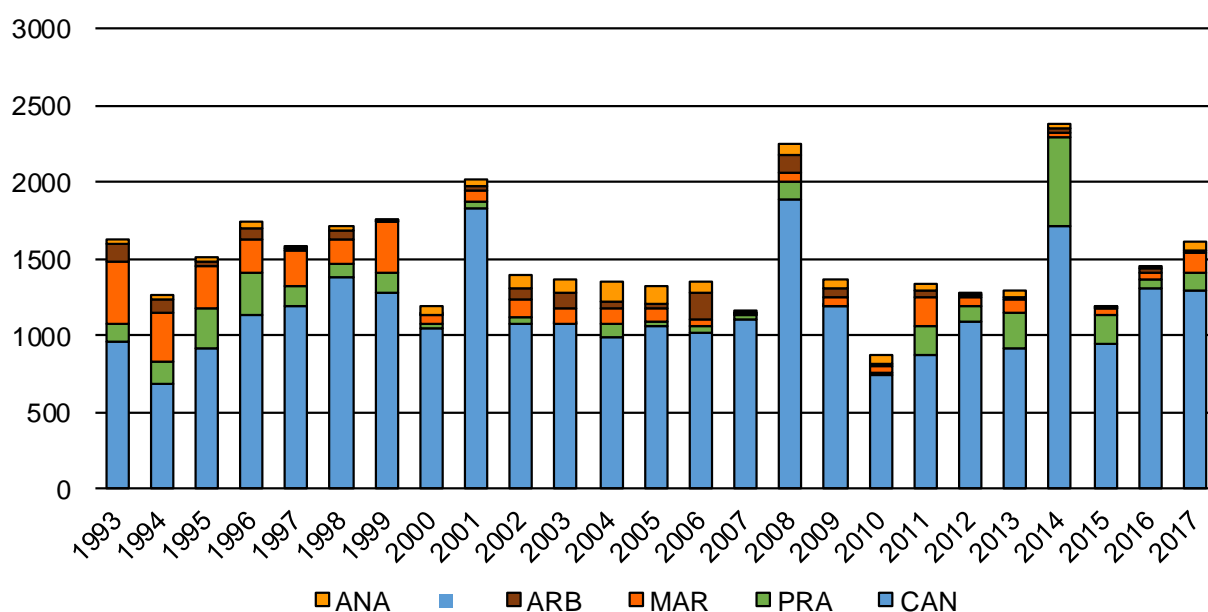
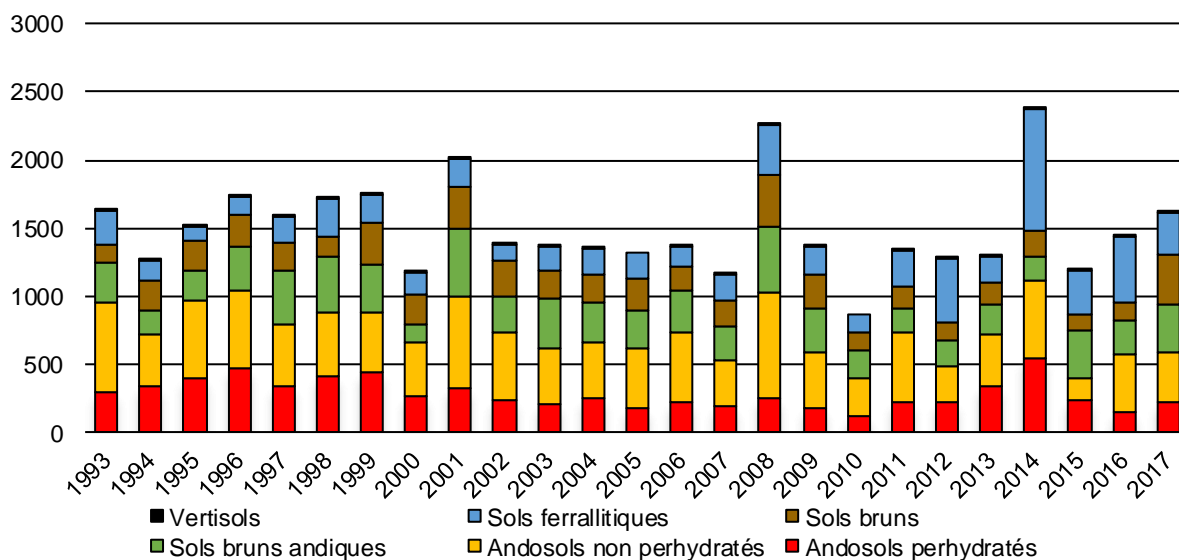


Figure 4 : Nombre d'échantillons prélevés par année et par cultures

Une analyse du nombre d'échantillons analysés chaque année montre de fortes variations du nombre d'échantillons analysés d'une année à l'autre, (Figure 4) , dues aux fluctuations du nombre de parcelles de canne à sucre replantées d'une année à l'autre suite à des événements climatiques extrêmes (sécheresse, cyclones, etc...). Cet effet se répercute sur la représentativité des types de sols selon les années (Figure 5).



**Figure 5 : Nombre d'échantillons prélevés par année et par type de sol**

Dans cette base de données, nous avons retenu les variables descriptives des échantillons listées dans le Tableau 1.

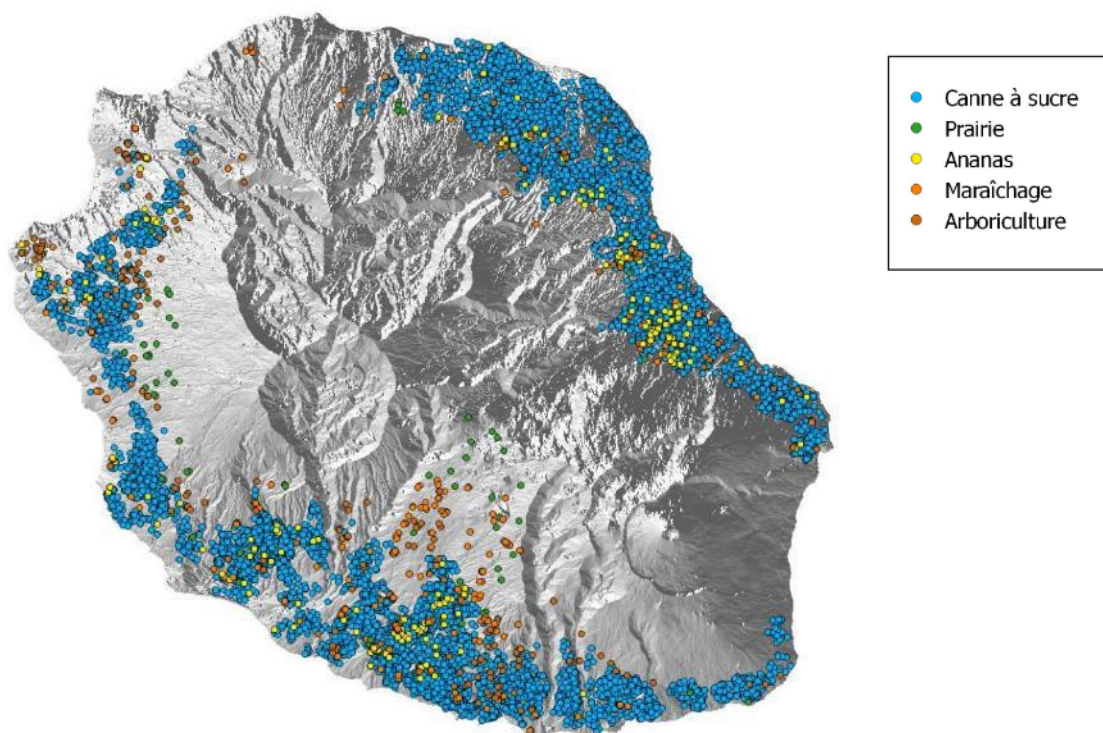
**Tableau 1 : Principales variables descriptives des analyses de sol**

CHRONO	Identifiant de l'échantillon
DATEARR	Date d'arrivée au laboratoire
EXPNUM	Nom de l'exploitant
EXPPREN	Prénom de l'exploitant
X_rgr92	Coordonnées X en UTM RGR92_Zone_40S (m)
Y_rgr92	Coordonnées Y en UTM RGR92_Zone_40S (m)
GEOALTIT	Altitude (m)
SOLCULTAV	Culture actuelle
SOLCULTPR	Culture précédente
SOLPROF	Profondeur de prélèvement (cm)
SOLTYPE	Code STIPA
C_ANNE	Carbone organique méthode Anne (g/100g de MS)
C_DUMAS	Carbone total méthode Dumas (g/100g de MS)
CA_ECH	Calcium échangeable (mé/100g de MS)
CEC	Cation échangeable Capacity (mé/100g de MS)
K_ECH	Potassium échangeable (mé/100g de MS)
MG_ECH	Magnésium échangeable (mé/100g de MS)
N_TOT	Azote Total (g/kg de MS)
NA_ECH	Sodium échangeable (mé/100g de MS)
P_ASS	Phosphore Assimilable (mg/kg de MS)
PH	pH de l'échantillon, brut ou en solution/suspension H2O
PH_KCL	pH du sol dans une solution de KCl 1N
COUPE_PAILLE	Export ou non de la paille de canne à sucre
SOLTYPE_SI	Type de sol simplifié à partir de SOLTYPE





Après un nettoyage de la base de données (élimination des échantillons de sols correspondant à des expérimentations agronomiques, élimination des échantillons dont les coordonnées sont aberrantes ou ne correspondent pas à une parcelle appartenant à l'agriculteur, échantillons de prélèvements profonds (>30 cm), etc...). Nous avons ainsi conservé 9334 analyses de sol (Figure 6).



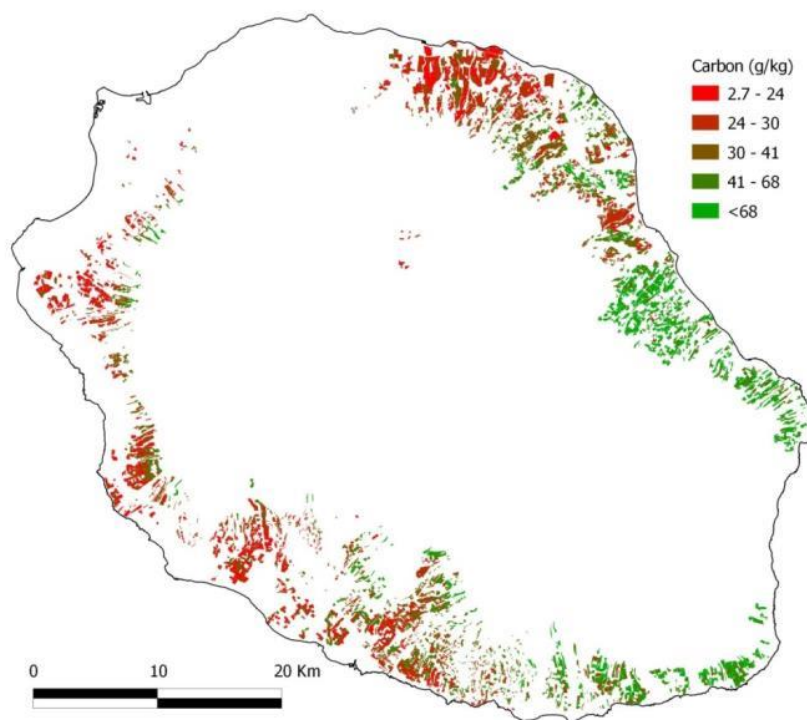
**Figure 6 : Localisation des analyses de sols retenues et des types de cultures**

L'analyse et l'interprétation de ces données nécessite d'y ajouter le type de sol. Nous disposons pour cela de la carte morphopédologique au 1/50000 établie par M. RAUNET (1991) qui identifie 93 unités de milieu pédologique. Ces 93 unités ont été regroupées en 2002 (Pouzet, D., 2002) à partir de leurs caractéristiques chimiques en domaines pédogénétiques, codifiés à partir des normes STIPA (1982) adaptées aux sols tropicaux, et traduites en grands types de sols : andiques non perhydratés, andiques perhydratés, bruns andiques, bruns, ferralitiques et vertiques (voir Annexe 1).

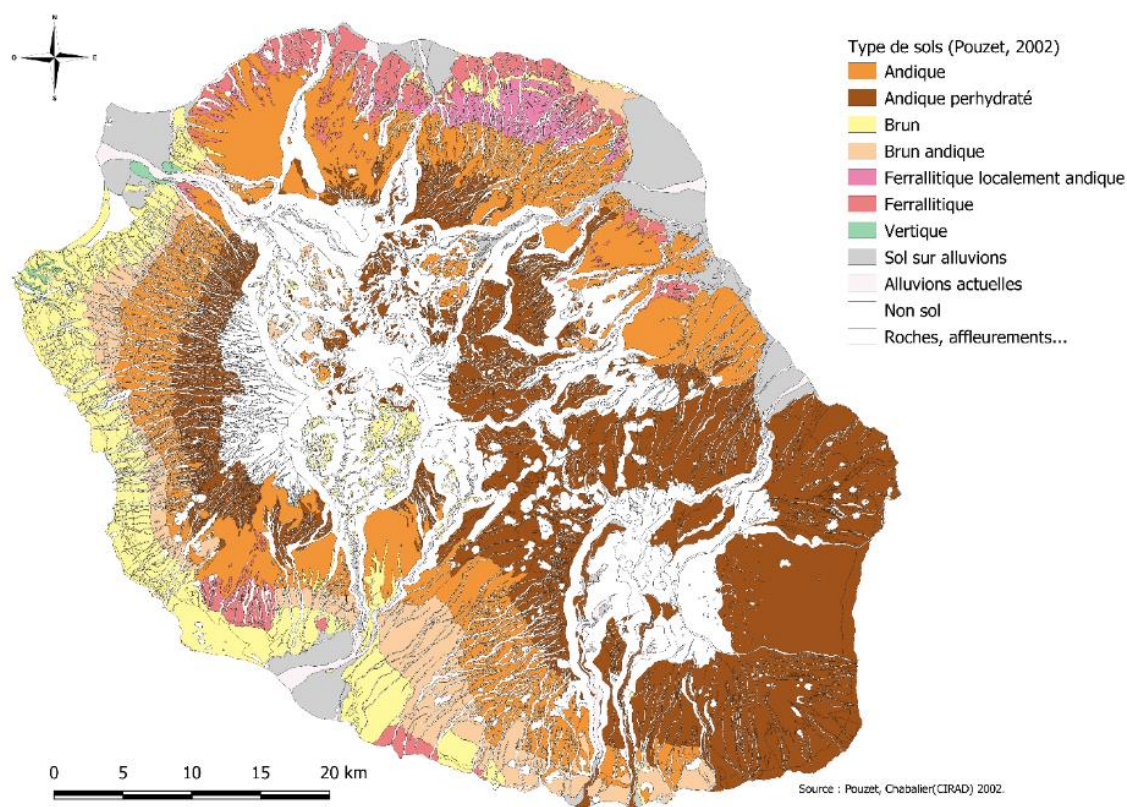
Nous avons en outre déterminé l'altitude et la pente du terrain à l'endroit du prélèvement par requête spatiale dans un modèle numérique de terrain (Litto3D®, IGN-SHOM, 2008).

### **3.1.2. Analyse spatiale et identification des déterminants du carbone du sol**

En cartographiant les teneurs moyennes par ilot culturel (identifié à partir du Registre Parcellaire Graphique), on remarque une structure spatiale prononcée des teneurs (Figure 7) : la côte Est et Sud-Est ainsi que les ilots situés en altitude dans l'Ouest ont des teneurs supérieures à 68 g.kg<sup>-1</sup>. Les teneurs les plus faibles (<25 g.kg<sup>-1</sup>) se trouvent en bord de littoral dans le Nord et dans l'Ouest. Ces teneurs augmentent généralement avec l'altitude dans ces régions, ce qui suggère une influence déterminante de la nature du sol par comparaison avec la carte des sols (Figure 8).



**Figure 7 : Cartographie de la teneur en carbone du sol moyenne par ilot cultural**



**Figure 8 : Carte morphopédologique simplifiée**

Pour identifier et hiérarchiser les déterminants de la variabilité de la teneur en carbone à l'échelle de l'île, nous avons utilisé la méthode des Boosted Regression Trees (BRT) (Friedman et al., 2000 ; Elith et al., 2008). Celle-ci permet de prédire une variable quantitative mais aussi et surtout d'interpréter le modèle à l'aide des indices d'importance. Ces indices permettent de hiérarchiser les différents prédicteurs.

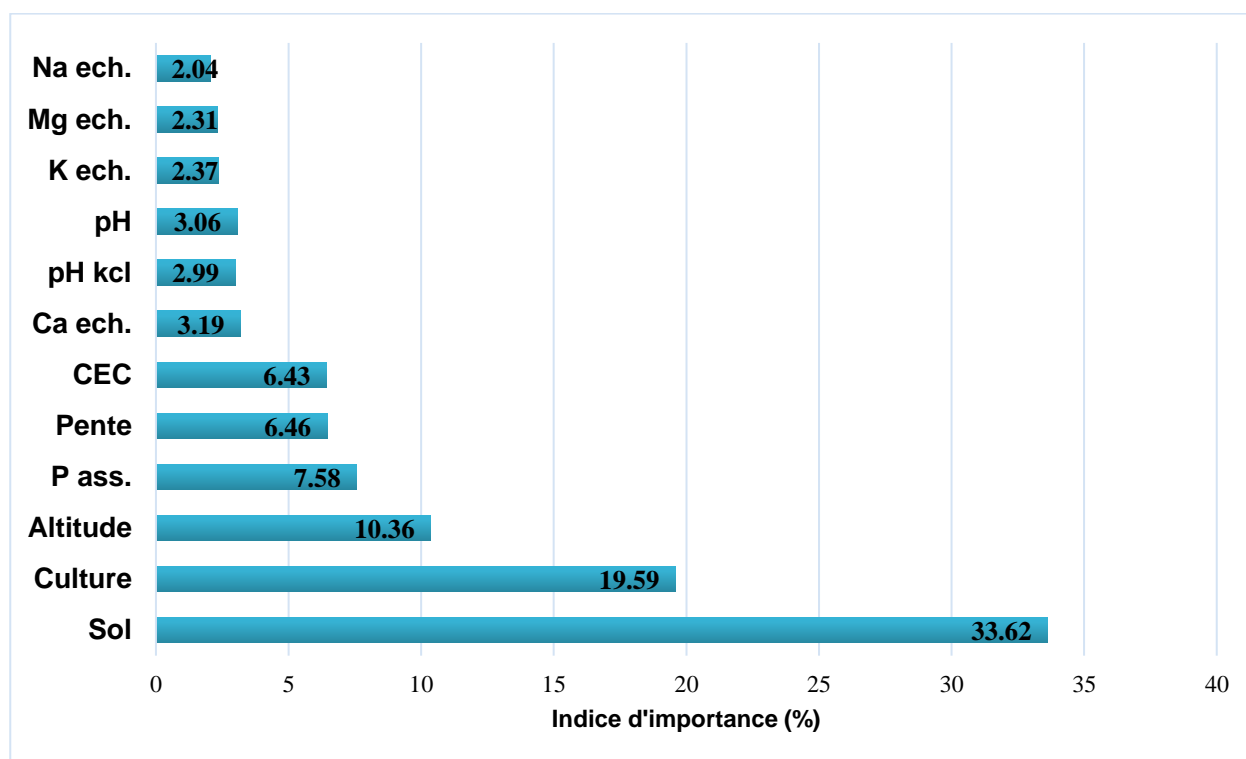
Les prédicteurs retenus pour le modèle sont les variables chimiques, hormis l'azote qui est corrélée linéairement avec le carbone, la culture, le type de sol, et les données topographiques (pente et altitude).

Les résultats du modèle sont satisfaisants quel que soit la méthode de validation utilisée avec un  $R^2$  de cross-validation de 0.86 et un  $R^2$  de validation externe de 0.67 (Tableau 2). Ces résultats montrent que nos prédicteurs expliquent bien la variabilité du carbone. Le modèle est donc interprétable.

**Tableau 2 : Statistiques prédictives de modèle BRT**

Validation	n <sub>obs</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE (g.kg <sup>-1</sup> )
k-fold cross validation	1500	0.83	13.60
Externe		0.67	14.02

La Figure 9 présente les indices d'importance de chaque prédicteur dans le modèle. La variable type de sol est prépondérante avec un indice de 33.6%, suivie par la culture avec un indice de 19.6%. L'altitude arrive en 3<sup>ème</sup> position avec un indice de 10.3% mais qui est un écho du type de sol. En effet à La Réunion l'altitude est fortement corrélée avec les quantités annuelles de précipitations, largement responsables du degré d'altération des roches et donc de la nature des sols : sols évolués ferralitiques à faible altitude (chaud, contraste marqué entre saison des pluies et saison sèche), et sols plus « jeunes » (andiques) à partir de 800m (fortes précipitations, saison sèche plus ou moins marquée selon l'altitude, températures plus fraîches). Les variables chimiques interviennent ainsi en troisième position après le type de sol et la culture.



**Figure 9 : Indice d'importance des prédicteurs dans le modèle BRT**

Pour confirmer ces résultats nous avons représenté les mesures de teneur en carbone du sol par domaine pédogénétique et par année (Figure 10). L'analyse de la teneur en carbone des échantillons sous canne à sucre au sein de chaque domaine pédogénétique révèle :

1- Une stabilité et une teneur élevée des teneurs de carbone au cours des 20 dernières années sous culture de canne à sucre à La Réunion. En effet cette culture est pratiquée à La Réunion depuis plus de 200 ans (>60% de la SAU aujourd'hui) selon un itinéraire technique très simple et conservateur : un labour et une replantation tous les 7 à 10 ans en moyenne. Par ailleurs la canne à sucre est une des plantes qui possède la plus forte efficacité de conversion du rayonnement lumineux (quantité de biomasse produite par quantité d'énergie lumineuse photosynthétiquement utile interceptée). Elle produit ainsi une grande quantité de biomasse annuelle. Avec un travail du sol minimal, celle-ci contribue à maintenir un stock de carbone du sol très élevé. En effet nous pouvons réaliser un bilan carbone très simplifié sur la base d'un scénario type de culture de canne à sucre : sur un rendement de 100T/ha en matière fraîche (MF), on produit :

- 27.2 t de tiges usinables en matière sèche (MS)
- 12 T/ha de résidus de récolte (ou mulch) en MS
- 6.5 T/ha de production racinaire en MS qui meurt et est renouvelé.



Appliquons un taux de minéralisation de 90% et 80% respectivement à la biomasse aérienne et à la biomasse racinaire. Soit une quantité de matière organique (MO) produite de :

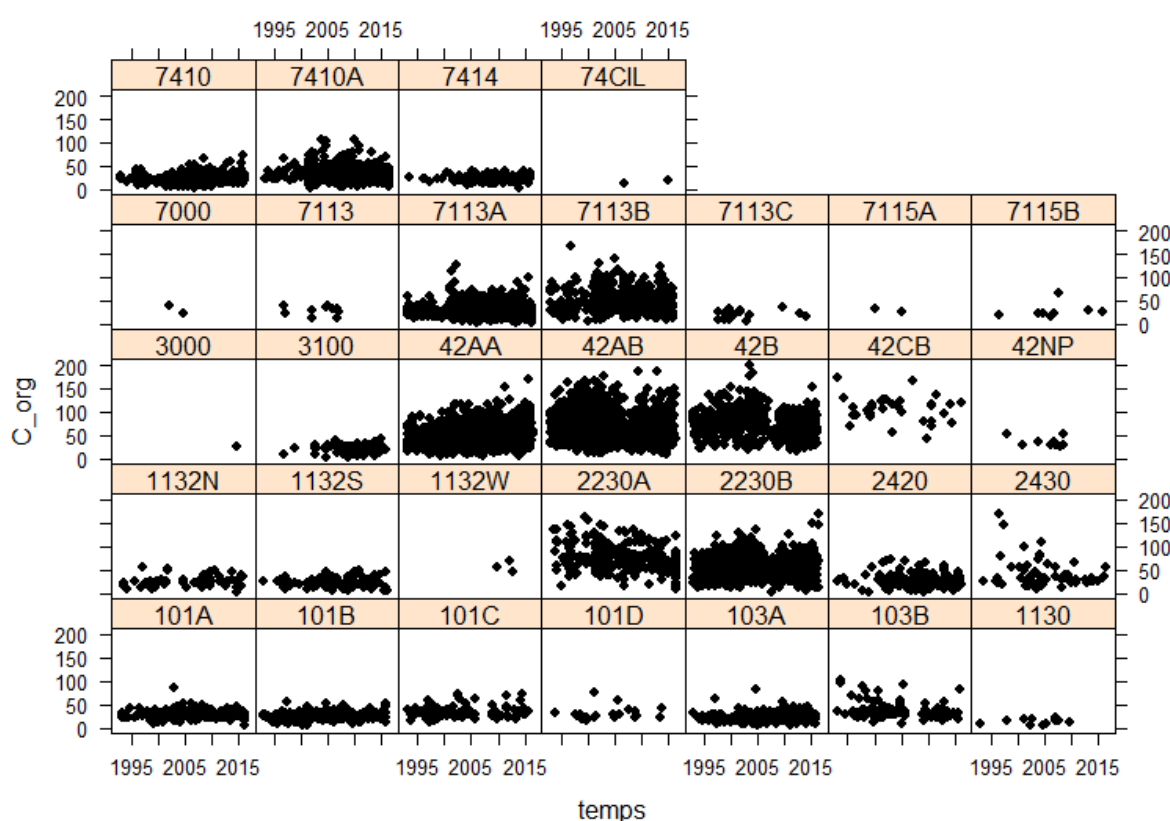
$$MO = (6.5 \times 0.2 + 12 \times 0.1) = 1.3 + 1.2 = 2.5 \text{ T/ha/an, soit environ } 1.2 \text{ t de C/ha/an.}$$

Il s'agit d'une des cultures qui restitue la plus grande quantité de carbone annuellement.

Malgré cet apport très important, sur des durées longues (20 ans), on constate une stabilité des valeurs de teneur en carbone observées par les analyses en fouille de données dans la base d'analyses des sols. On fait donc l'hypothèse que le potentiel de stockage du carbone a été atteint dans ces systèmes de très longue durée. On peut donc supposer que l'effet des pratiques culturales en canne à sucre sur la teneur en carbone des sols sera très faible et difficilement détectable par rapport à la quantité apportée à chaque cycle ainsi qu'à la quantité native contenue dans les sols réunionnais.

2- Une variabilité très élevée au sein de certains types, qui n'est pas compatible dans certains cas avec la nature minéralogique du sol et les pratiques agricoles. C'est le cas des types STIPA 42AA et 42AB identifiés comme sols andiques non perhydratés, 42B, 42CB et 2230 identifiés comme sols andiques perhydratés, et 7113 identifié comme sol brun andique (Figure 10).

En effet on observe des teneurs variant d'un facteur 4 à 5 au sein d'un même type de sol. Observer de tels écarts sur un même type de sol et un même usage séculaire et n'est pas cohérent.

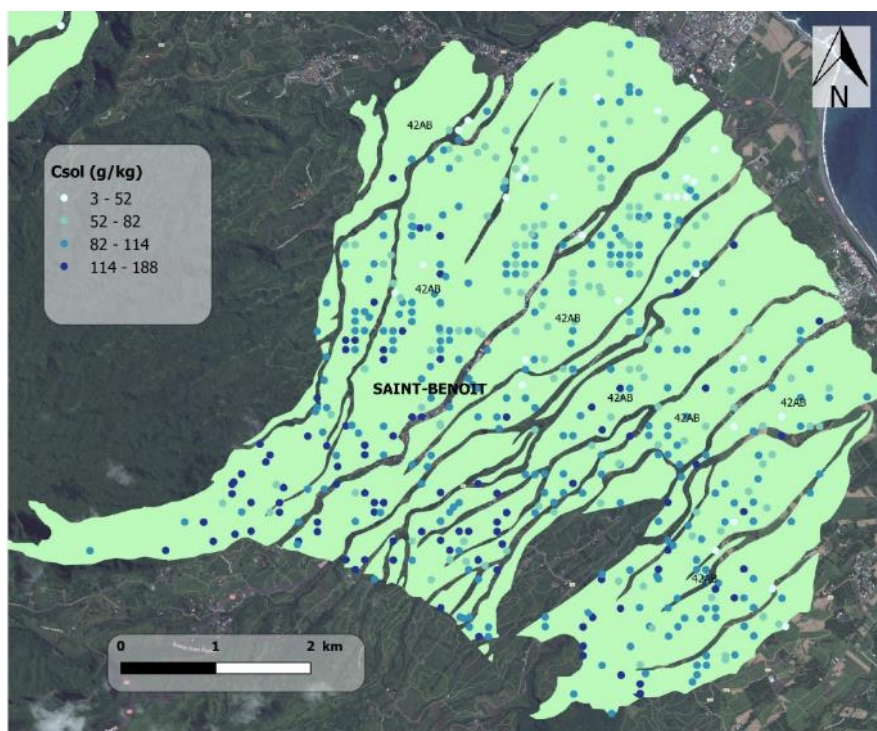


**Figure 10 : Variabilité de la teneur en carbone sous canne à sucre par domaine pédogénétique (codification STIPA)**

Pour comprendre l'origine d'une telle variabilité, nous avons eu recours à une analyse spatiale basée sur la superposition géographique des unités pédologiques et des mesures de teneur en carbone. Une analyse visuelle met en évidence la présence de d'échantillons de teneur en carbone croissante avec l'altitude dans un même domaine pédogénétique (unité 42AB, Figure 11) : de plus de 100 g/kg en altitude à moins de 50 g/kg près du littoral.

Ce gradient reflète l'effet du climat sur le degré d'altération des allophanes, minéral amorphe nanocristallin présent dans les andosols. Ceux-ci sont en effet caractérisés par une forte teneur en minéraux amorphes issus de la dégradation de la roche mère vitreuse d'origine volcanique (hydratation et pertes de bases et de silice) qui confère au sol une très grande surface spécifique, allant de pair avec une forte capacité d'adsorption de la matière organique sous forme de complexes organo-minéraux stables. La teneur en carbone des sols andiques est donc nettement plus élevée que celle des sols plus évolués tels que les sols ferralitiques, ou les sols argilo-limoneux européens. La teneur en carbone d'un sol andique perhydraté sous canne à sucre peut ainsi contenir

200 g de C pour 1000 g de sol (soit environ 300 t/ha sur les 30 premiers cm de profondeur) quand un sol sous forêt tempérée en contient 30 g (soit environ 80 tC/ha).



**Figure 11 : Variabilité de la teneur en Csol mesurée dans une unité pédologique 42AB**

Fond de carte : Bing © Microsoft 2018, © CNES 2018

Dans le cas de l'unité 42AB de la Figure 11, l'apparition d'une saison sèche de plus en plus longue au fur et à mesure que l'on se rapproche du littoral provoque une déshydratation croissante des allophanes. Celle-ci est irréversible. La surface spécifique du sol et sa capacité à adsorber la matière organique en sont donc corollairement réduits.

Ces résultats montrent que la classification morphopédologique des sols de la Réunion ne constitue ainsi pas un zonage du territoire par unités homogènes du point de vue du carbone du sol. La carte morphopédologique de Raunet (1991) repose en effet moins sur des analyses de sol que sur une interprétation du paysage et du modelé de terrain.

### 3.2. Stratification du territoire

Pour calculer l'impact des changements d'usages agricoles des sols nous avons envisagé d'utiliser le calculateur de bilan de carbone Ex-ACT ({Bernoux, 2010 #557}) développé par la FAO et de l'appliquer sur l'ensemble des surfaces cultivées. Ce calculateur estime ex-ante l'impact des projets de développement agricole et forestier sur les émissions de GES et la séquestration de carbone dans le sol.

Il réalise les inventaires des GES (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, et CO<sub>2</sub>) sur les aires géographiques d'un projet par rapport à un scénario de référence (pas de mise en œuvre du projet). C'est-à-dire les surfaces sur lesquelles on applique un changement d'usage du sol. Ces aires doivent être des unités agro-pédo-climatiques homogènes du point de vue des paramètres intervenant dans le bilan carbone (climat, stocks de carbone du sol).

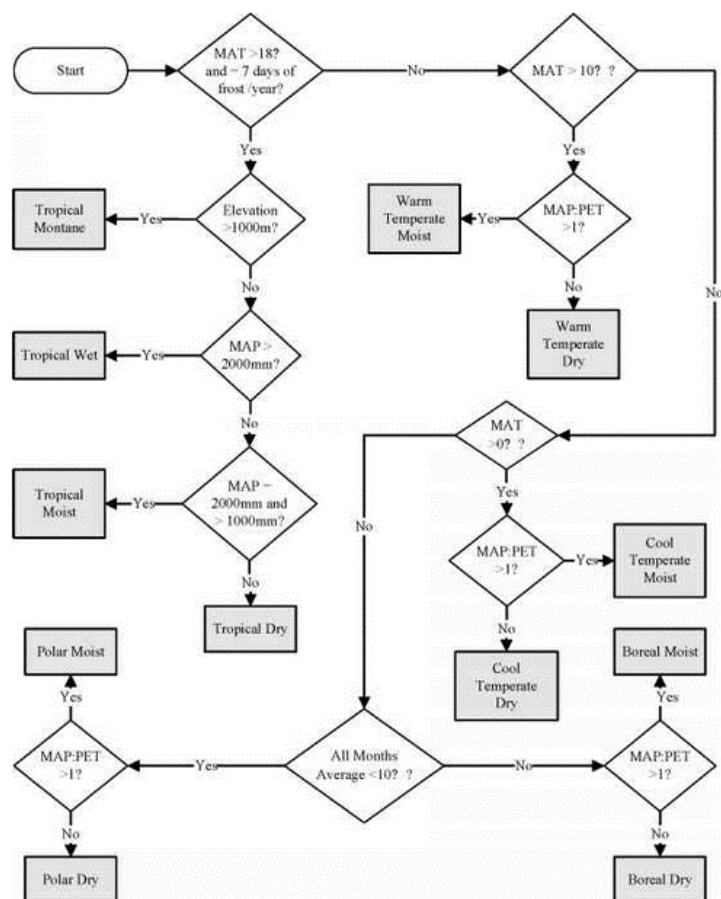
Pour appliquer ce modèle nous avons donc procédé à la stratification du territoire en unités spatiales homogènes du point de vue des caractéristiques pédoclimatiques.

#### 3.2.1. Zonage climatique

L'arbre de décision de la Figure 12 regroupe les critères définissant les grands types de climats reconnus par l'IPCC.

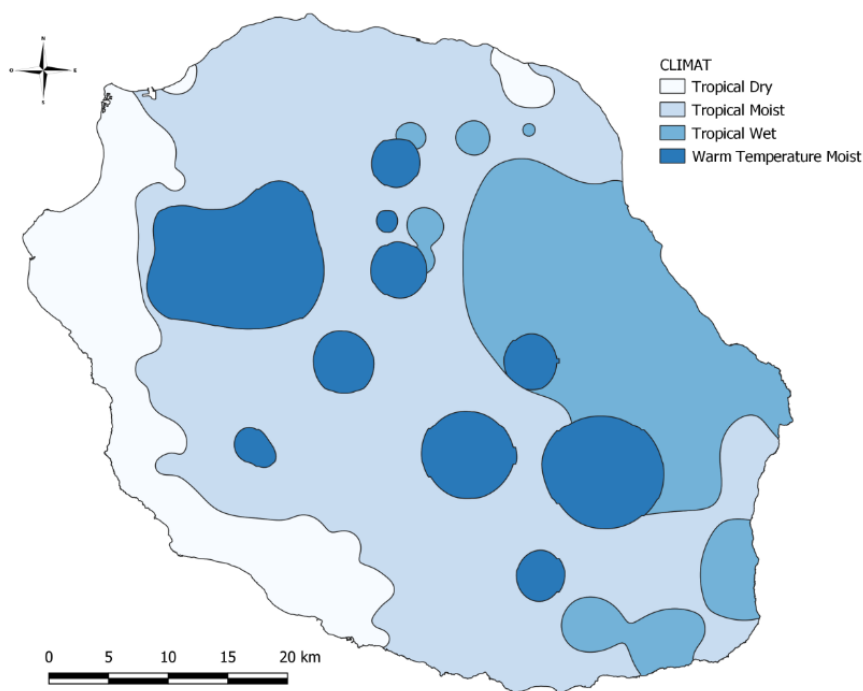
Le réseau de stations météorologiques CIRAD-MétéoFrance à La Réunion nous permet d'estimer les paramètres climatiques : précipitations, températures et ETP, sur les zones agricoles.

Un modèle d'interpolation des données climatiques quotidiennes, tenant compte des gradients altitudinaux des variables météorologiques (précipitations, températures et ETP) observés sur l'île, a été appliqué à un semis de points de résolution 500 m x 500 m. Nous avons retenu la moyenne annuelle décennale et avons créé les lignes d'iso-valeurs correspondant aux critères climatiques de l'IPCC.



**Figure 12 :Schéma de classification des régions climatiques définies par l'IPCC**  
 MAT = température moyenne annuelle (°C), MAP = précipitations annuelles moyennes (mm), PET = ETP (mm)

Des polygones ont été générés par intersection de ces lignes entre elles. Le type de climat de chaque polygone a été déterminé par application de l'arbre de décision (Figure 13).



**Figure 13 : Zones climatiques IPCC**

### 3.2.2. Zonage pédologique

Les unités pédologiques décrites dans la carte morpho-pédologique de La Réunion présentent une variabilité de la teneur en carbone incompatible avec une nature minéralogique homogène et donc avec la modélisation du bilan carbone telle que réalisé par l'outil Ex-ACT. Nous avons donc procédé à une reclassification de ces unités.

La spectroscopie en proche infrarouge (PIR) a déjà fait ses preuves pour estimer la teneur en matière organique du sol. Mais les longueurs d'onde utilisées correspondent à des harmoniques des longueurs d'onde dont l'énergie est celle des liaisons O-H, C-H et N-H. En revanche les longueurs d'onde utilisées en moyen infrarouge (MIR) équivalent exactement à l'énergie de ces liaisons, ainsi qu'à celle des liaisons C-C, C-O, C-N, et Si-O, Al-O. La spectroscopie en MIR est potentiellement plus performante que la spectroscopie en PIR pour caractériser la matière organique des sols et leur minéralogie.

Nous choisissons donc de définir une typologie des unités de sol fondée sur la signature spectrale en moyen infrarouge des échantillons de sols de la pédothèque du laboratoire d'analyses de sols de La Réunion.

974 échantillons de sols (prélevés sur une profondeur de 0-30cm) géo-référencés, issus de parcelles de canne à sucre, ont été sélectionnés.

Ces échantillons, répartis sur l'ensemble des surfaces cultivées (Figure 14), ont fait l'objet d'analyses de sol au laboratoire du CIRAD et fournissent les teneurs en carbone du sol de chaque échantillon (Tableau 3).

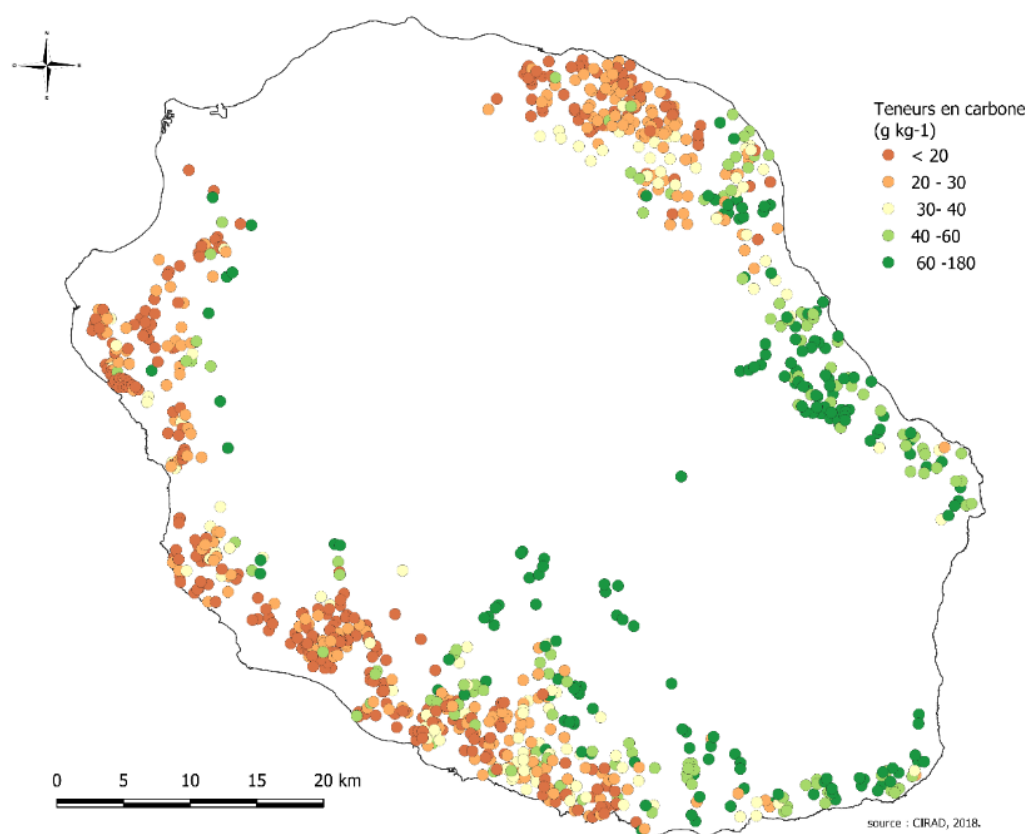


Figure 14 : Carte des teneurs en carbone des 974 échantillons de sol avec un spectre MIR

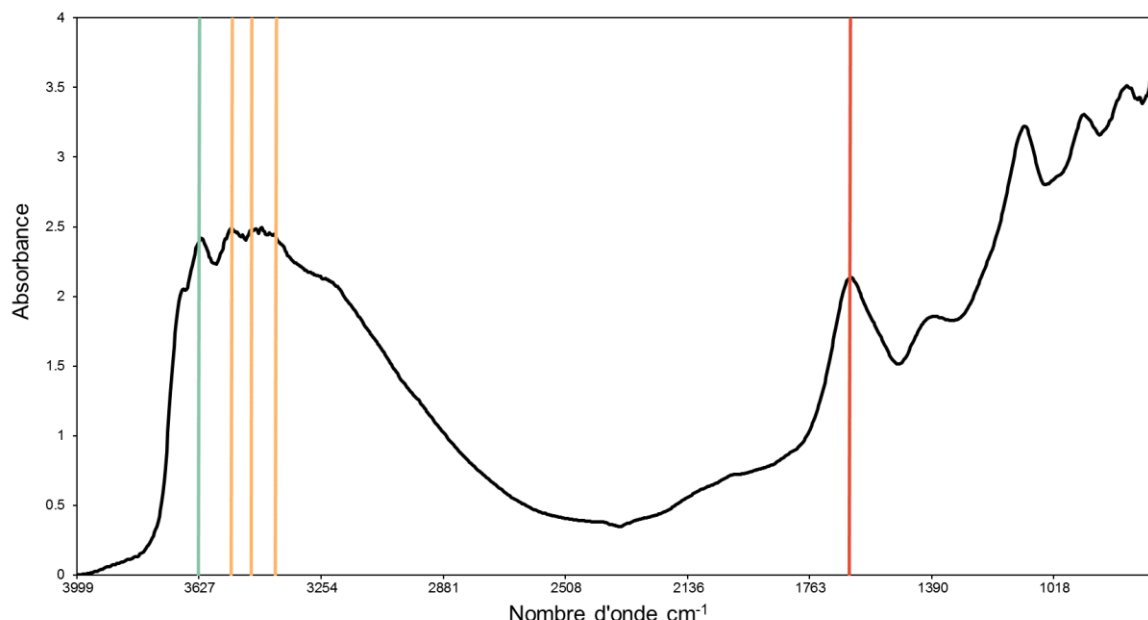
Tableau 3 : Statistiques descriptives des 974 analyses de sol

Analyse	C	N	pH	pHKCl	P	CEC	Ca	Mg	K	Na
Unités	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>			mg kg <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>
Moyenne	41.7	3.41	5.88	4.97	199.18	11.18	6.02	3.60	0.62	0.24
Ecart-type	27.4	2.18	0.84	0.68	265.54	7.51	5.13	3.29	0.70	0.26
Min	3.4	0.41	4.12	3.67	2.06	1.56	0.04	0.05	0.01	0.02
Q1	23.3	1.95	5.22	4.47	59.02	5.26	1.78	1.08	0.15	0.08
Médiane	32.0	2.65	5.76	4.86	112.77	8.85	4.54	2.51	0.38	0.15
Q3	5.43	4.33	6.46	5.35	232.94	15.67	9.49	5.23	0.90	0.29
Max	182.6	15.14	8.79	7.62	2572.36	43.09	28.39	20.54	7.48	3.00



Avec des teneurs en carbone variant de 3 à 183 gC kg<sup>-1</sup> et une teneur en carbone moyenne de 42 gC kg<sup>-1</sup>, les 974 analyses sont représentatives de la base de données d'analyses de sol de 10 000 échantillons, utilisée pour établir la carte des stocks de carbone, dont les teneurs en carbone varient également de 3 à 200 gC kg<sup>-1</sup> avec une moyenne de 45 gC kg<sup>-1</sup>.

Pour chaque échantillon de sol, récupéré à la pédothèque du laboratoire d'analyses de sols de La Réunion, un spectre en MIR a été acquis (Figure 15).



**Figure 15 : Exemple de spectre moyen infra-rouge**

Or, certaines bandes d'absorption (en nombre d'ondes), correspondant à des vibrations d'élongation et/ou de déformation des liaisons interatomiques, elles peuvent effectivement être associées à certains minéraux (Figure 15).

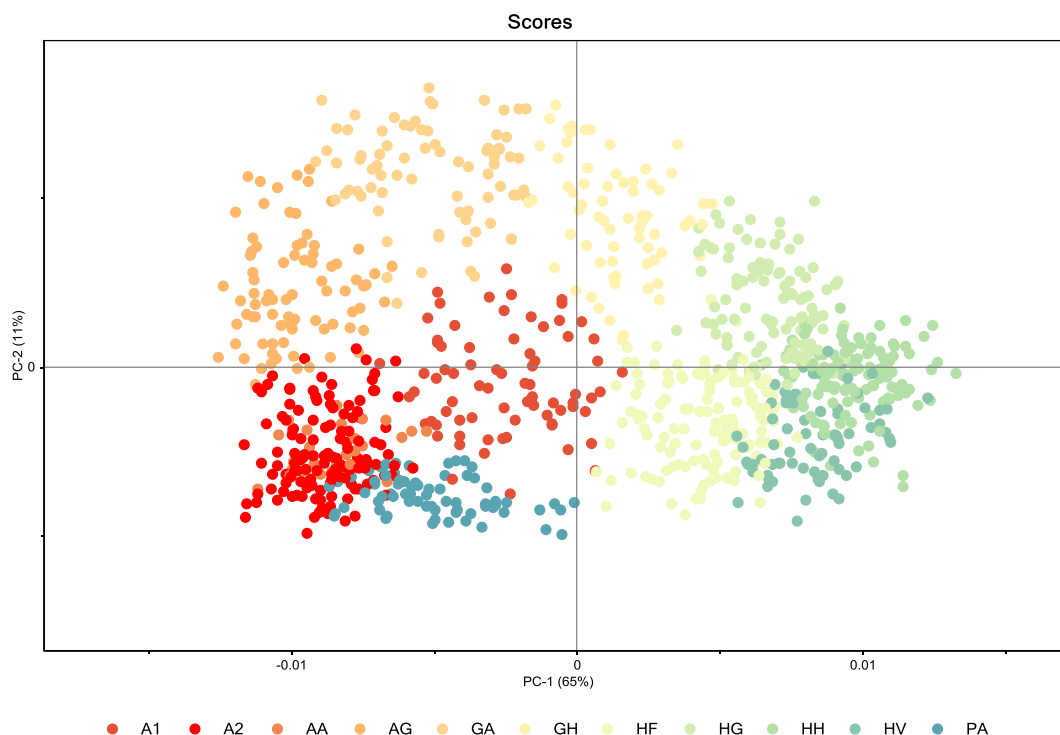
A titre d'exemple, ce spectre présente une bande d'absorption à 3626 cm<sup>-1</sup> permettant de caractériser la présence d'hallowite tandis que les trois bandes d'absorption à 3527, 3464 et 3391 cm<sup>-1</sup> sont caractéristiques de la gibbsite. Quant à l'absorbance élevée à 1640 cm<sup>-1</sup>, elle traduit la présence plus ou moins importante d'eau de constitution (Parikh et al., 2014). Les spectres en moyen infra-rouge permettent ainsi d'approcher rapidement et qualitativement la composition minéralogique des échantillons de sol.

L'objectif étant de définir des unités pédologiques homogènes à partir d'une information spectrale, les 974 spectres moyens infra-rouge (MIR) ont été prétraités (lissage, ligne de base, dérivée seconde) afin de mettre en évidence les pics d'absorption liés à la phase minéralogique et organique.

Nous leur avons ensuite appliqué une méthode de clustering, basée sur l'algorithme K-means, qui les a répartis en 11 groupes.

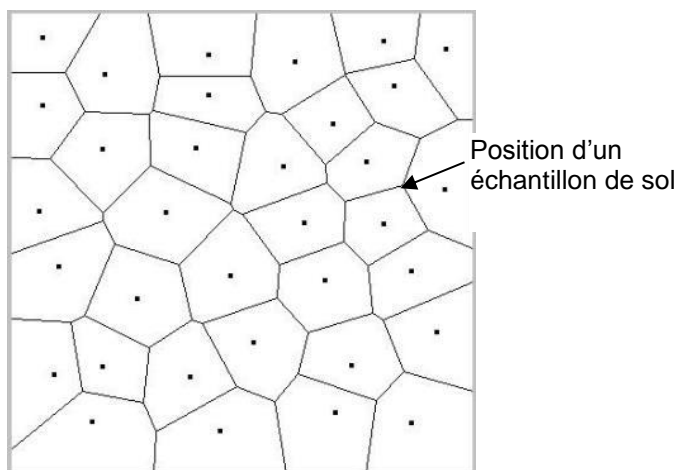
La méthode de classification non supervisée par K-means, simple et robuste, permet de former des groupes homogènes (les échantillons sont aussi semblables que possible au sein d'un groupe) et différenciés (les groupes sont aussi dissemblables entre eux que possible).

La Figure 16 montre en effet qu'une analyse en composantes principales des spectres MIR permet de séparer les échantillons selon les différents clusters obtenus par le partitionnement K-means.



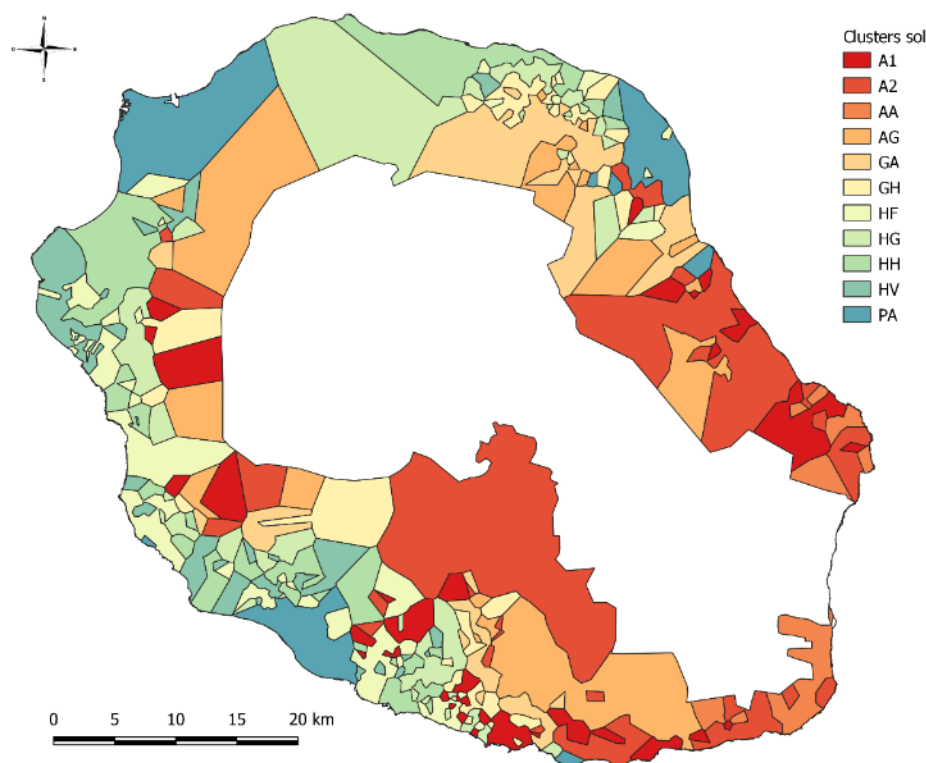
**Figure 16 : Analyse en composantes principales des spectres MIR d'échantillons de sol**

La géolocalisation des échantillons permet de définir des cellules de Voronoï qui partitionnent le territoire en autant de polygones qu'il y a d'échantillons de sol. Chaque polygone est défini tel que chaque point à l'intérieur du polygone est plus proche de l'échantillon se situant à l'intérieur du polygone que des autres échantillons (Figure 17).



**Figure 17 : Partitionnement de l'espace en cellules de Voronoï**

Après fusion des cellules de Voronoï appartenant au même cluster nous obtenons une carte d'unités pédologiques relativement homogènes de l'espace cultivé (Figure 18).

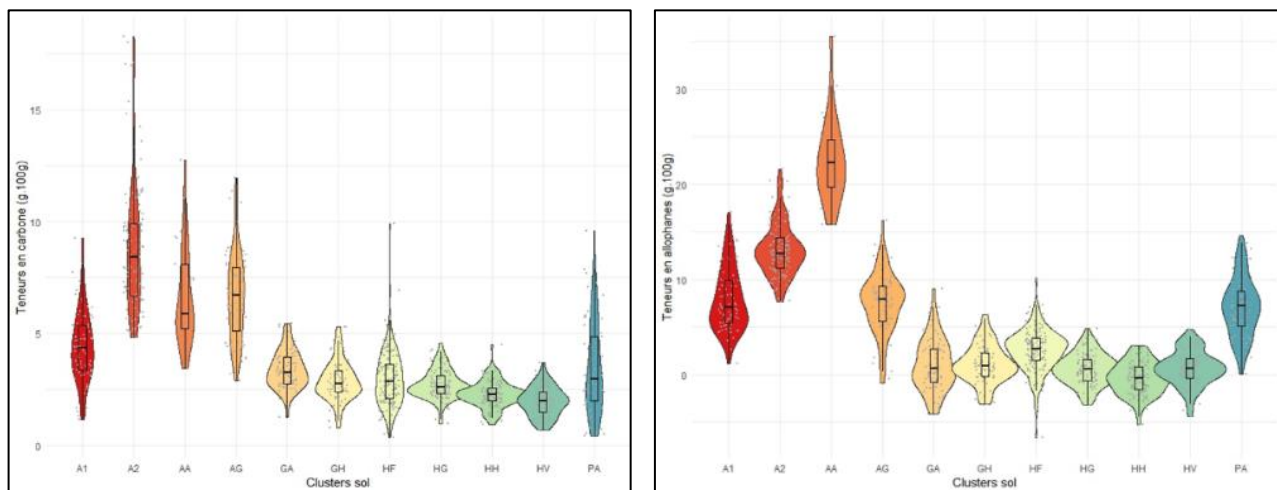


**Figure 18 : Carte d'unités pédologiques homogènes**

Les échantillons de sols sous canne à sucre ont donc été répartis en 11 clusters, homogènes d'un point de vue spectral. L'analyse des teneurs en carbone par cluster (Figure 19a) montre des valeurs relativement homogènes et présente des coefficients de variation des teneurs en carbone plus faibles que pour les classifications morpho-pédologiques précédentes, présentées dans le paragraphe 3.1.2. Les clusters, définis à partir de spectres MIR, semblent donc mieux adaptés que les anciennes classifications pour discriminer les sols en fonction de leur teneur en carbone.

De plus, afin de caractériser ces clusters d'un point de vue minéralogique, les produits amorphes ont été prédits à partir des spectres MIR et des modèles de prédiction présentés dans le paragraphe 3.3.1.

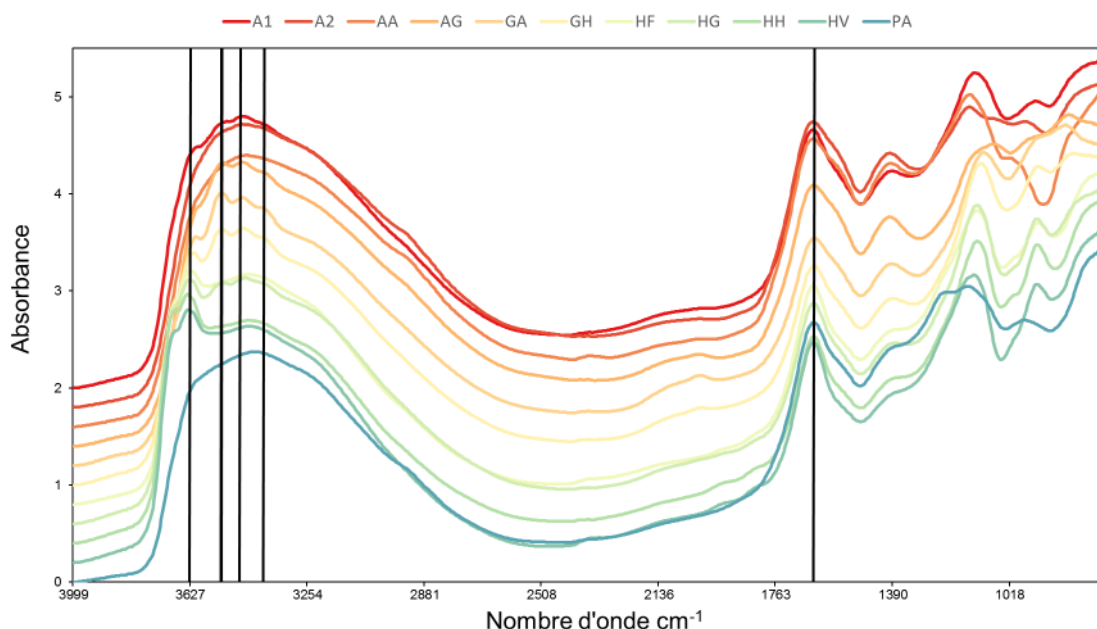
Les teneurs en allophanes, minéraux amorphes (aluminosilicates) présents notamment dans les sols volcaniques tels que les andosols, dont les teneurs ont été estimées à partir de la formule de Mizota and Reeuwijk (1989) ( $\text{allophanes (\%)} = 100\text{Sio}/[23.4-5.1(\text{Alo}-\text{Alp})/\text{Sio}]$ ), sont présentées dans la Figure 19. Les teneurs en allophanes discriminent fortement les sols étudiés (Figure 19b) ainsi les sols notés A1, A2, AA, AG et PA ont des caractères allophaniques qui les classent dans les andosols.



**Figure 19 : Teneurs de carbone mesurées (a) et teneurs en allophanes prédites (b) des 974 échantillons de sol par cluster**

D'autre part, l'analyse des spectres moyens des clusters permet également de déterminer la nature minéralogique des unités pédologiques (Figure 20).

La bande d'absorption à  $3626\text{ cm}^{-1}$ , présentant une absorbance élevée, permet ainsi de repérer les clusters où la présence d'halloysite (H) est importante (HV, HH, HG, HF). La gibbsite (G), quant à elle, est présente dans plusieurs clusters (GA, GH où elle est majoritaire) et est reconnaissable à ces trois bandes d'absorption caractéristiques ( $3527$ ,  $3464$ ,  $3391\text{ cm}^{-1}$ ). Enfin, l'absence de pics d'absorption entre  $3800$  et  $2800$  couplée à une absorbance élevée à  $1640\text{ cm}^{-1}$  (eau de constitution) traduisent la présence d'allophanes (A1, A2, AA) (Parikh et al., 2014).



**Figure 20 : Spectres moyens des 11 clusters de sol et identification des bandes d'absorption correspondant aux minéraux présents dans les sols de La Réunion**

C'est cette typologie de sols, fondée sur la signature spectrale des sols, qui sera utilisée dans la suite de nos travaux présentés ici. La spectroscopie dans le moyen infrarouge sera également utilisée à fins de prédictions des teneurs et stocks de carbone dans les sols.

### 3.2.3. Unités pédoclimatiques

Nous obtenons les unités pédoclimatiques utilisables par le calculateur Ex-ACT par intersection des unités pédologiques avec les zones climatiques IPCC (Figure 21).

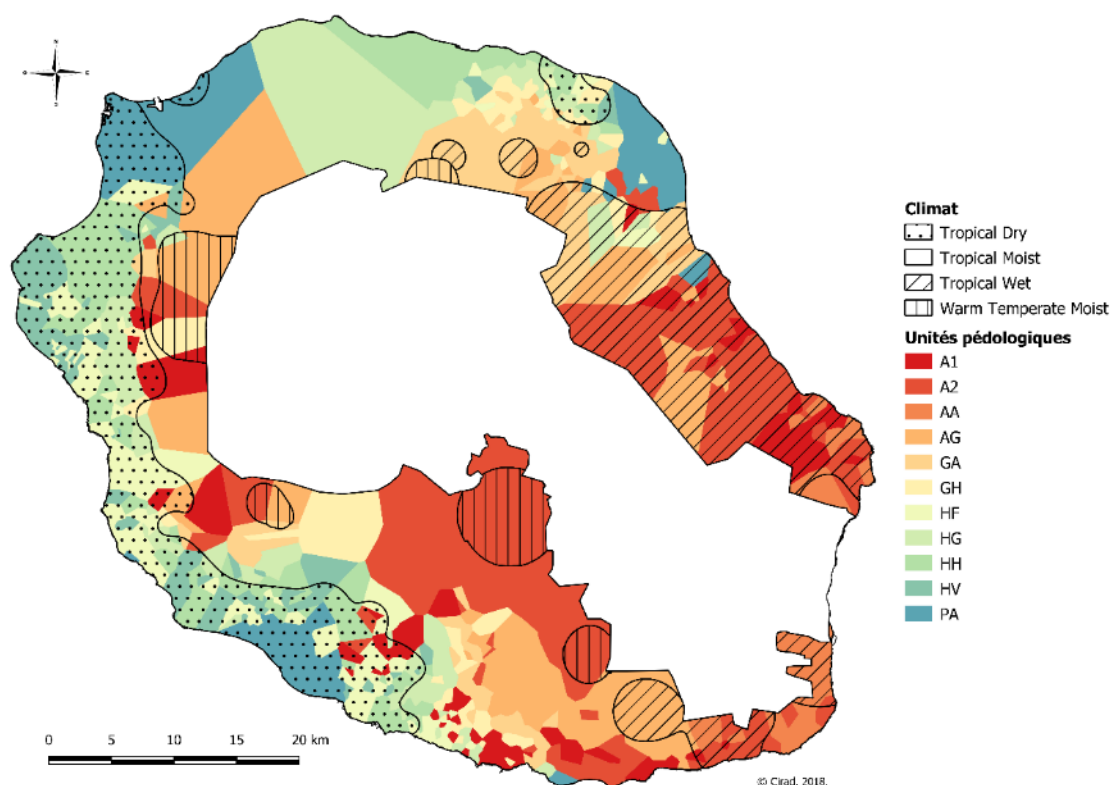


Figure 21 : Carte des unités pédoclimatiques

Avant d'appliquer l'outil Ex-ACT sur ces unités, il nous faut caractériser leur stock de carbone pour chaque mode d'usage.

### 3.3. Méthodologie d'évaluation des stocks de carbone du sol

Les données disponibles dans la base d'analyses de sols permettent d'évaluer la teneur en carbone du sol sur les principaux types de sols. Si les analyses sous canne à sucre sont nombreuses, les analyses sous les autres usages sont moins nombreuses, plus récentes et l'historique de ces cultures moins bien connu. Par ailleurs la densité apparente ( $D_a$ ) n'est évidemment pas mesurée sur les échantillons analysés au laboratoire. Des prélèvements et mesures de terrain complémentaires ont donc été réalisées.

#### 3.3.1. Des teneurs aux stocks : évaluation de la densité apparente

Le stock de carbone du sol est calculé à partir de l'équation :

$$\text{Stock de Csol} = \text{teneur en Carbone} \times D_a \times \text{épaisseur} \times (1 - \text{taux}(EG)) \quad \text{Eq. 1}$$

Avec EG : éléments grossiers (>2mm)

L'épaisseur de sol retenue est celle qui est utilisée comme référence dans les études sur le changement climatique : 30 cm.

Le taux d'éléments grossiers n'a pas été estimé dans cette étude, même si les données recueillies nous permettront dans un deuxième temps d'évaluer des valeurs moyennes dans chaque unité pédoclimatique. Ici nous appliquons la valeur nulle.

La densité apparente est en général mesurée par la méthode des cylindres de prélèvement (méthode de référence), extrêmement lourde en main d'œuvre et contraignante. Il n'était pas possible dans le cadre du projet C@RUN de réaliser ces mesures sur chaque unité pédologique et mode d'usage.

C'est pourquoi nous avons développé une méthode alternative robuste et peu chère de prédiction des stocks de Csol par spectroscopie infrarouge.

Nous avons ainsi construit une base de données d'apprentissage pour construire des modèles de prédiction de la teneur en carbone du sol, de la  $D_a$  et des stocks de carbone du sol. La base est constituée de 95 échantillons (11 sites, 1 à 3 répétitions, 1 échantillon pour de 10 cm de sol) accompagnés 1- des spectres en PIR et en MIR

mesurés sur sol frais et sur sol séché tamisé (PIR) ou séché broyé à 2µm (MIR), 2- des mesures de laboratoire de teneur en carbone du sol et 3- des mesures de Da mesurées par la méthode de référence au cylindre. Les spectres ont été acquis avec un spectroscope ASD LabSpec 5000 (PIR) et un spectroscope Agilent FTIR 4300 portable (MIR) (Figure 22 et Figure 23).

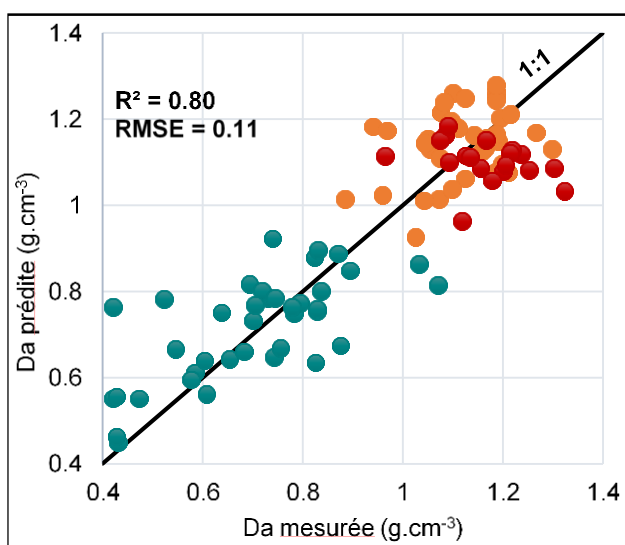
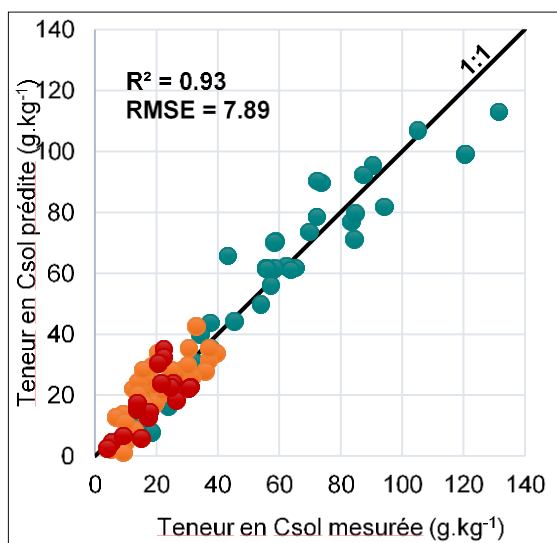


Figure 22 : Spectroscopie ASD LabSpec 5000

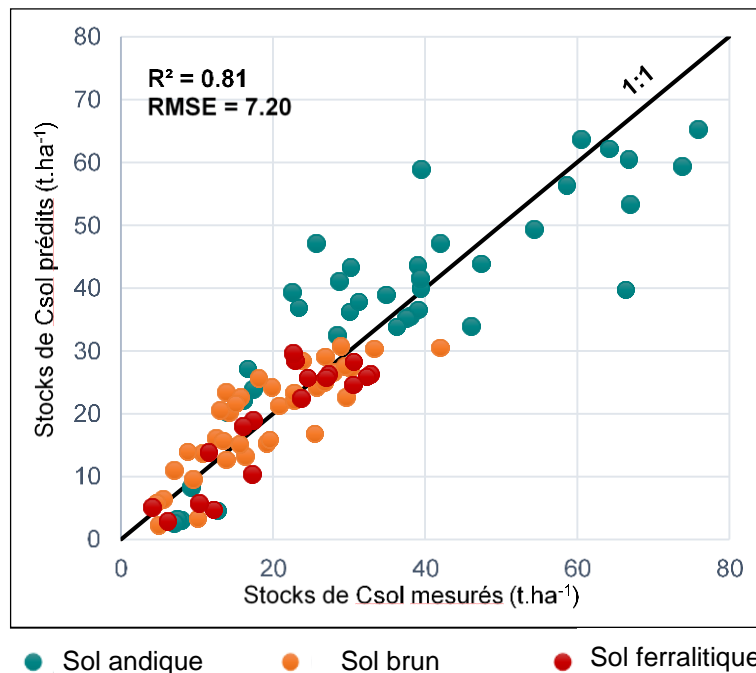


Figure 23 : Spectroscopie moyen infrarouge (FTIR 4300 Agilent)

Les performances obtenues sont très satisfaisantes, aussi bien en PIR qu'en MIR (tableau de l'Annexe 2 et Figure 24) pour les trois variables prédites.







**Figure 24 : Comparaison des prédictions par spectroscopie MIR et des mesures de laboratoire et de terrain**

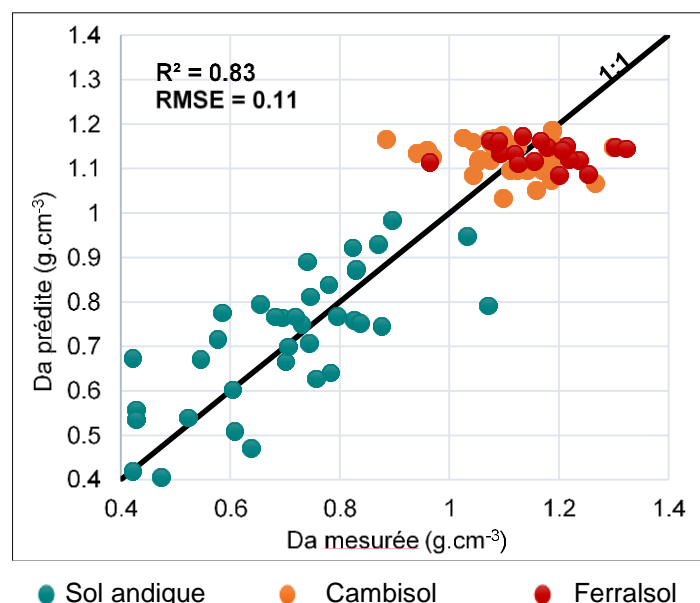
Il est néanmoins très étonnant de pouvoir prédire une valeur physique du sol, la densité apparente, à partir de mesures sensibles à la composition chimique de l'échantillon.

Des analyses complémentaires des extraits des composants (Si, Al, Fe) des minéraux amorphes (allophanes) contenus dans les échantillons ont permis d'établir des équations de prédictions de ces valeurs à partir des spectres en MIR avec une bonne précision (Tableau 4). Or la teneur en minéraux amorphes est un déterminant majeur de la porosité des sols andiques et donc de leur densité apparente. En effet la Figure 25 montre que la densité apparente est très bien prédite à partir des teneurs en minéraux amorphes. Ceux-ci constituent donc bien un proxy de la Da des sols andiques.

C'est donc grâce à leur présence que nous pouvons prédire avec une bonne fiabilité (7.2 t.ha<sup>-1</sup>) le stock de carbone de ces sols.

**Tableau 4 : Performance des modèles de prédiction MIR des composants des minéraux amorphes**

Noncristalline minerals	R <sup>2</sup>	RMSE (‰)	RPD
Si <sub>oxalate</sub>	0.91	2.31	3.46
Al <sub>oxalate</sub>	0.91	6.25	3.23
Al <sub>pyrophosphate</sub>	0.82	2.07	2.34
Fe <sub>oxalate</sub>	0.77	4.12	2.30
Fe <sub>CBD</sub>	0.80	8.69	2.25
Al <sub>CBD</sub>	0.76	3.82	2.14
Fe <sub>pyrophosphate</sub>	0.70	3.11	2.06



**Figure 25 : Prédiction de la Da des sols andiques à partir de la teneur des composants des minéraux amorphes (modèle de prédiction de type PLSR)**

Nous avons ainsi développé une méthode peu destructive et peu couteuse de mesure des stocks de Csol.



Une collaboration avec l'IRSTEA (UMR ITAP « Information -Technologies - Analyse environnementale – Procédés agricoles ») est en cours pour développer un capteur de type fibre optique, à bas cout, dédié et optimisé pour mesurer le spectre infrarouge des sols

### 3.3.2. Les stocks de carbone du sol selon les modes d'usages et les types de sol : mesures et évaluation à partir de données extraites de la base de données

#### 3.3.2.1. Les stocks de carbone du sol mesurés selon le type de sol et les modes d'usage

Une campagne de terrain a permis de connaître, à partir de stocks de carbone mesurés, le différentiel de stockage du carbone selon les modes d'usage et les grands types de sol de La Réunion (stage de Master 2, Ramos M., 2017).

La méthode utilisée est celle des paires c'est-à-dire que pour un type de sol donné il est recherché des sites les plus proches possibles ayant subi des modes d'usage des sols bien différenciés (Figure 26). Le mode d'usage canne à sucre sera la référence quand il existe ; dans le cas contraire, la référence sera le mode d'usage prairie de longue durée. Ses références seront comparées à des modes de gestion telle que le maraîchage (cultures à cycle court : plusieurs cultures par année) ou la culture de l'ananas (cycle long : une seule culture par année) (Tableau 5).

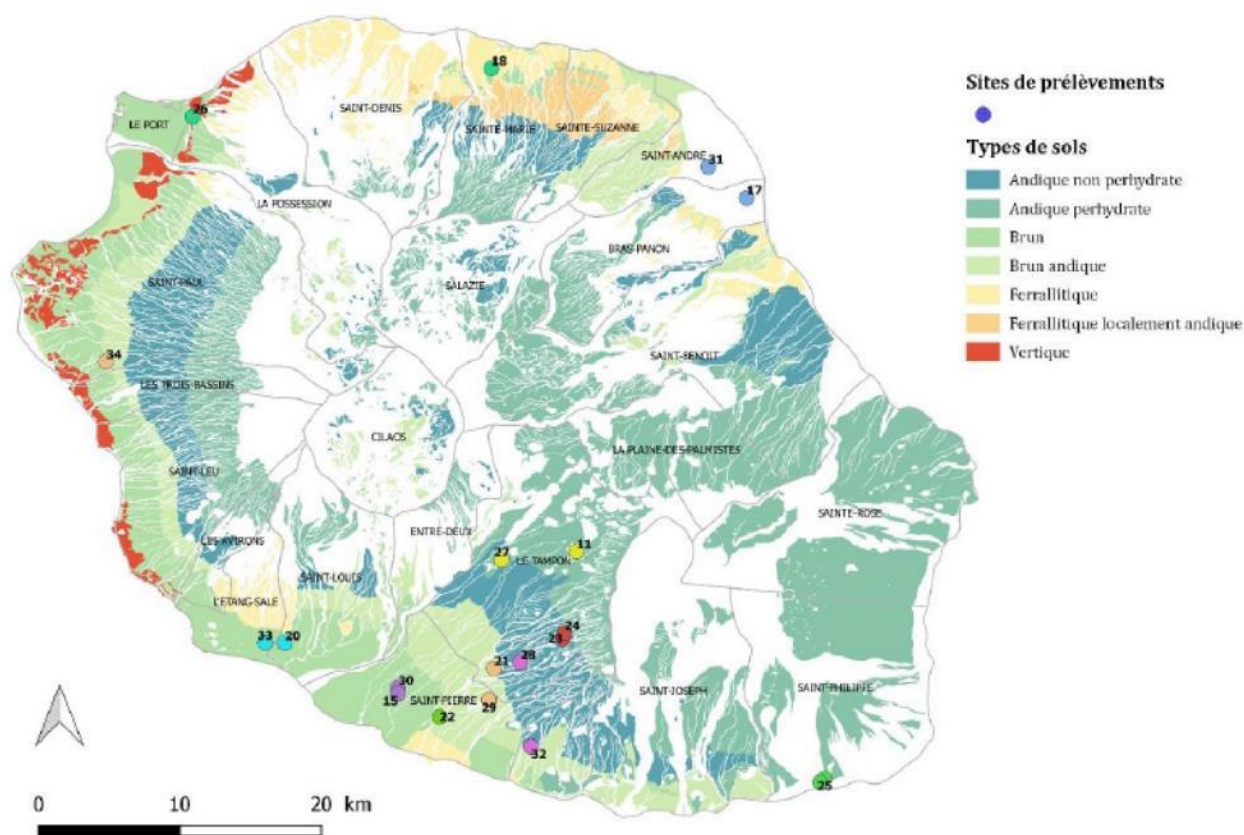


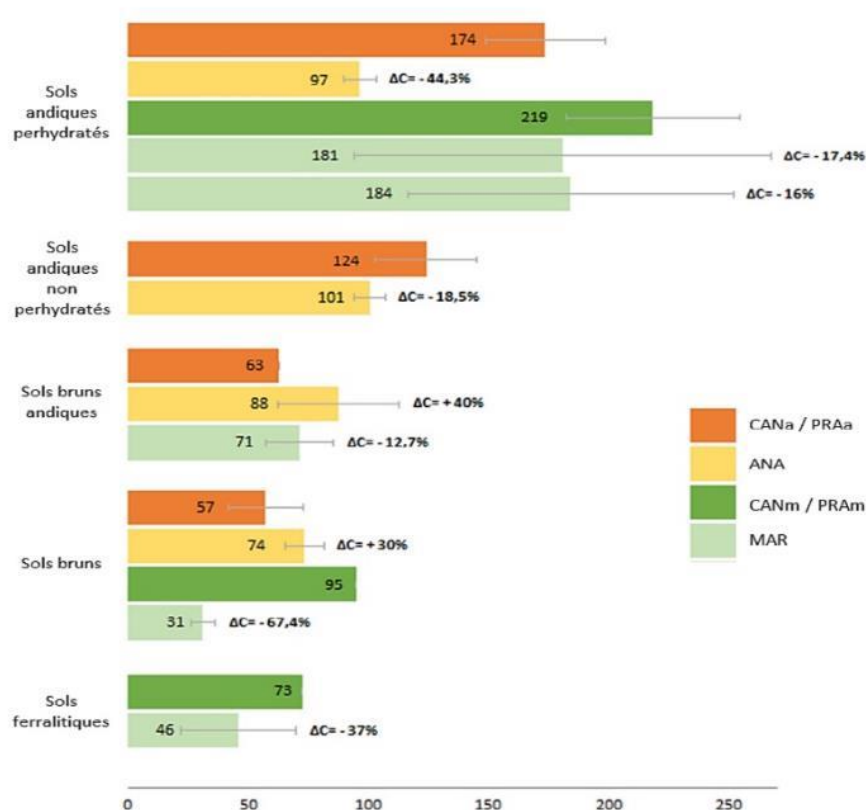
Figure 26 : Carte de la localisation des sites de comparaison de stock

**Tableau 5 : Caractéristiques des pratiques des parcelles maraichères (MAR) et sous cultures d'ananas (ANA) étudiées pour la comparaison des stocks de carbone du sol, avec des parcelles contiguës en culture de canne à sucre.**

Site	Situation	Altitude (m)	Pente	Durée culture (année)	Apport MO (t/ha/an)	Profondeur de travail du sol	Nb d'opérations de travail du sol/an	Résidus	Trafic au champ (an)
27	MAR_AP	1155	nulle	67	9	20	3	enfouis	9
31	ANA_AP	87	faible	8	0.22	40	1	enfouis	4
23	MAR_ANP	1210	moyenne	2	6.13	40	3	enfouis	9
28	ANA_ANP	715	faible	9	11.8	25	1	enfouis	4
34	MAR_BA	510	forte	5	25	15	2	enfouis	6
29	ANA_BA	450	forte	6	0.1	25	1	retirés	2
33	MAR_B	9	faible	8	0	40	1	retirés	2
30	ANA_B	145	faible	10	11.8	25	1	retirés	4
26	MAR_F	33	faible	40	0	20	4	enfouis	8

(AP : sols andiques perhydratés ; ANP : sols andiques non perhydratés ; BA : sols bruns andiques ; B : sols bruns ; F : sols ferralitiques)

Les stocks de carbone organique des sols ont été évalués pour une profondeur de 40 cm, à partir de trois répétitions par parcelle. La méthode de mesure de la densité apparente et celle dite au cylindre. La nomenclature des sols et celle proposée par D. Pouzet (2002).



**Figure 27 : Stock de carbone du sol (MgC ha<sup>-1</sup>) selon le type de sol et son usage**

Les stocks de carbone des références (canne à sucre ou prairie) sont toujours plus élevés que les stocks mesurés dans les systèmes maraichers et/ou ananas (Figure 27). Les stocks de carbone, pour les références, sont de l'ordre de 200 tC ha<sup>-1</sup> pour les sols andiques perhydratés, et cette valeur diminue jusqu'à 70 tC ha<sup>-1</sup> lorsque les sols sont de moins en moins andiques (sol brun andique vers sol ferralitique). La diminution du stock de carbone organique du sol en culture maraichère est de 16 à 67 % du stock de la référence. Il semblerait que les sols à minéraux cristallisés (brun et ferralitique) soient plus sensibles à la diminution du stock de carbone du sol lors d'un changement d'usage (type maraichage) que les sols ayant des propriétés andiques. Il est à noter que, lorsque les apports en intrants organiques sont élevés (site #30 sous culture d'ananas), le stock de carbone du sol est plus élevé que la référence, montrant ainsi que la gestion des intrants organiques est un des déterminants du stockage de carbone dans les sols et peut contrôler les pertes liées au travail du sol annuel (minéralisation et érosion) et aux faibles restitutions racinaires sous culture maraichère.

On notera une forte variabilité intra-parcellaire des stocks de carbone des sols. Cette variabilité a pour origine la variabilité locale des processus d'altération des roches volcaniques (nature et chimie des roches) ainsi que des processus de détachement/transport/dépôt (l'érosion des sols), qui peuvent être, aux échelles géologiques, fort intenses dans ces reliefs volcaniques jeunes (sous des pluies très érosives (ex. : cyclones).

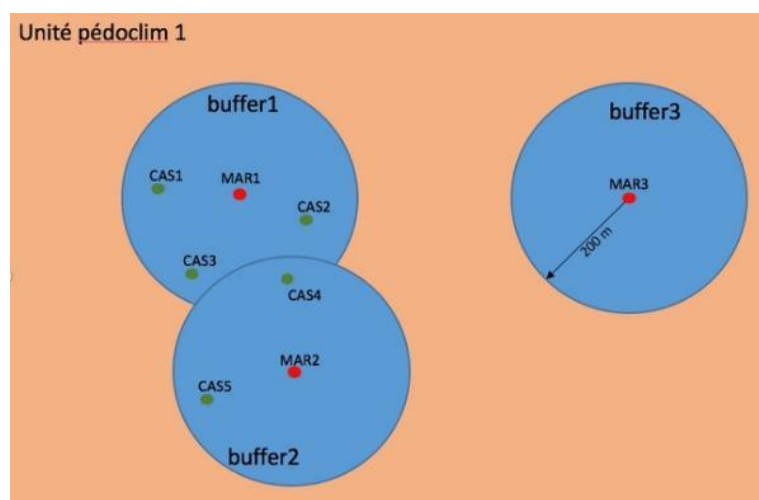
Les stocks de carbone sous culture de canne de sucre sont toujours élevés et contrôlés par la nature du sol et les restitutions organiques liées à la culture de la canne à sucre (racines, mulch). Les systèmes maraichers ayant toujours un antécédent canne à sucre, ils sont ainsi responsables d'un déstockage du carbone du sol, qui peut être remarquable mais atténué par des apports d'intrants organiques en quantité élevée.

Cette étude a été réalisée sur un nombre restreint de sites, car les méthodes d'acquisition des données de terrain restent dispendieuses en temps, malgré l'apport de la spectroscopie IR. La base de données LIMS à notre disposition (voir paragraphes précédents) sera mise à contribution pour une évaluation de l'impact des modes d'usage sur les stocks de carbone des sols.

### 3.3.2.2. Les stocks de carbone du sol évalués à partir de la base d'analyses de sols

La base d'analyses de sol présentée plus haut dans ce rapport nous permet de disposer d'un nombre très important de données sur la teneur en carbone du sol selon divers modes d'usage. Afin d'atténuer la très forte variabilité de la teneur en carbone du sol, inhérente à la variabilité locale des propriétés des sols (même dans la même unité pédologique), nous avons utilisé une approche spatiale pour la sélection d'échantillon de sols afin d'optimiser l'effet 'mode d'usage' pour une unité pédoclimatique donnée.

Le mode d'usage canne à sucre est considéré comme la référence pour toutes les unités pédoclimatiques où la culture de la canne est dominante. La notion de référence pour l'usage canne à sucre est soutenue par le fait que les teneurs en carbone du sol sous cet usage ne varient que très peu dans le temps (Allo et al., 2017) pour un type de sol donné. Nous considérons ainsi que le stock de carbone du sol sous canne à sucre est à l'équilibre pour une unité pédagogique donnée. La méthode spatiale proposée consiste à comparer dans un rayon de 200 m (dénommé 'buffer') le stock de carbone du sol d'un usage autre que la canne à sucre à ses voisins sous culture de canne à sucre de longue durée, pour une unité pédoclimatique donnée. La Figure 28 illustre cette méthode.



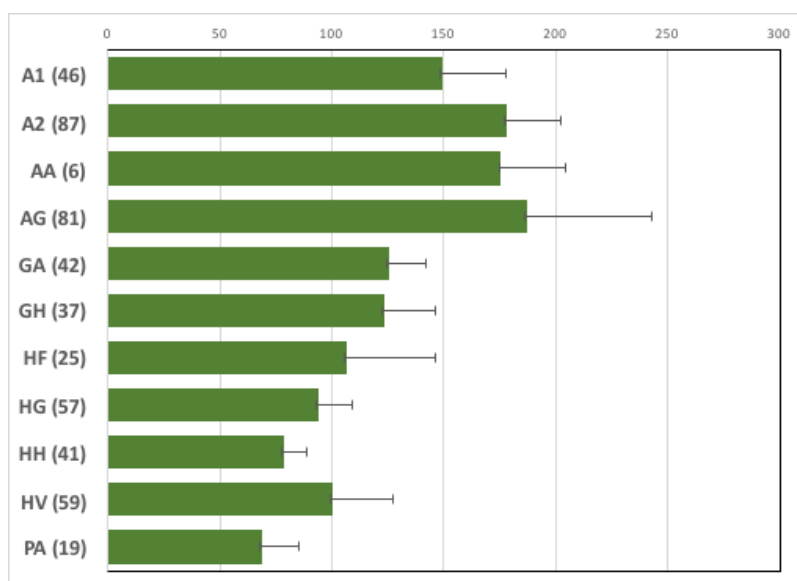
**Figure 28 : Modalités du choix des échantillons pour comparaison de stocks de carbone du sol selon usage des terres, à partir de base d'analyses de sol (géoréférencées)**

Une requête spatiale permet d'identifier les couples canne à sucre – autres usages. Les autres usages sont le maraîchage, la monoculture d'ananas, l'arboriculture si, les cultures prairiales. Une moyenne des stocks de carbone du sol est calculée pour chaque usage du sol et dans chaque buffer (le nombre (n) de buffers est donné dans le tableau ci-après) ; une différence de stocks pour chaque unité pédoclimatique est proposée, associée à un test de différence significative de moyenne des stocks de carbone des deux usages concernés.

Alors que les mesures de terrain présentées ci-dessus ont permis d'analyser une dizaine de paires, cette méthodologie nous a permis de tester **500** couples canne à sucre – autres usages, sur l'ensemble du territoire agricole dont 253 ont été retenus selon des critères statistiques.

La moyenne des stocks de carbone du sol des sites de référence (canne à sucre de très longue durée), exprimé en  $\text{MgC ha}^{-1}$ , pour chaque type de sol, sont présentés dans la Figure 29. La typologie des sols utilisée est celle fondée sur la signature spectrale des sols et présentée en page 22. Rappelons que les sols dont le nom commence (i) par A sont des andosols ou les allophanes sont très présents, (ii) par G des ferralsols où la

gibbsite domine, (iii) par H des ferralsols et nitisols où l'halloysite domine, (iv) par P pour les sols peu évolués d'apport des grands cônes de déjections.



**Figure 29 : Stocks de carbone du sol (MgC ha<sup>-1</sup>) sous culture de canne à sucre, extraits de la base de données pour la couche 0-30 cm (la valeur entre parenthèses correspond au nombre de buffers)**

Les sols riches en allophanes ont des stocks de carbone du sol supérieur à 150 MgC ha<sup>-1</sup> alors que le stock est deux fois moindre pour les sols à halloysite. Le type de sol est bien le déterminant majeur des stocks de carbone du sol, quelle que soit l'échelle spatiale considérée.

L'évolution des stocks de carbone du sol selon les types de sol, le climat et les usages des terres est présenté dans le Tableau 6 ; ne sont présentés dans ce tableau que les modes d'usage ayant une moyenne des stocks de carbone du sol significativement différente de la référence ; les résultats sur l'ensemble des couples possibles, dans tous les pédoclimats, se trouvent en Annexe 6.

De manière globale mais significative, les modes d'usage autres que canne à sucre montrent des stocks de carbone organique nettement inférieurs à ceux de la référence. Cette différence de stocks peut atteindre plus de 40 % du stock initial. Toutefois des systèmes prairiaux permettent une augmentation significative du stock de carbone de près de 25 %, pour une seule unité pédoclimatique du dispositif étudié.

Si l'on ne prend en compte que les usages déstockants par rapport à la référence (en orange dans le Tableau 6), la moyenne du déstockage est de **30 MgC ha<sup>-1</sup> (17 à 46% du stock de la référence)**.

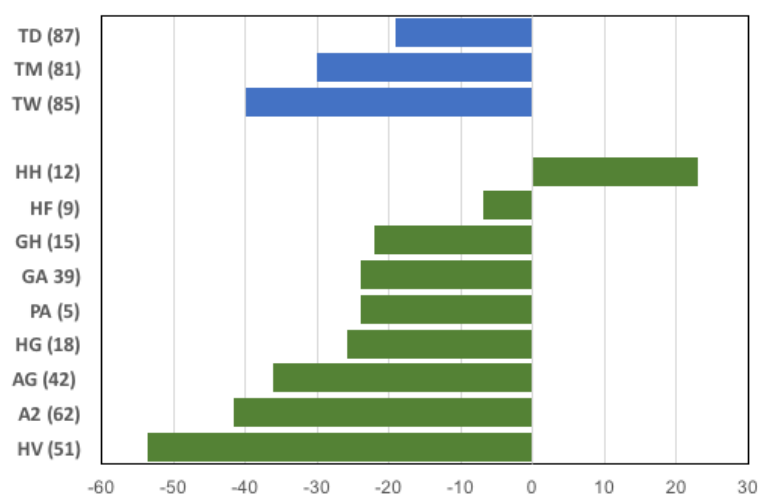
Ainsi est-il possible d'émettre l'hypothèse que ce sont essentiellement la quantité (et la qualité) des intrants organiques et le type de travail du sol qui contrôlèrent le déstockage du carbone du sol : les systèmes maraîchers *sensu lato* ne permettent pas de fortes restitutions organiques et appliquent au sol une perturbation régulière (travaux de préparation du sol et de sarclage), à la différence du système canne à sucre.

**Tableau 6 : Stocks de Csol (0-30 cm)**

Climat	Sol	Usage alternatif	stockC canne	stockC alternative	ΔStockC	Var /Canne	n	pvalue
Tropical Dry	HV	arboriculture	131	64	-67	-51%	20	0,0004
Tropical Wet	A2	ananas	216	159	-57	-27%	42	0,0000
Tropical Dry	HV	maraichage	86	46	-40	-46%	31	0,0000
Tropical Wet	AG	ananas	238	199	-39	-16%	36	0,0004
Tropical Moist	HF	maraichage	145	111	-34	-24%	4	0,0621
Tropical Moist	AG	ananas	132	99	-33	-25%	6	0,0430
Tropical Dry	HG	maraichage	103	76	-27	-26%	14	0,0001
Tropical Moist	A2	arboriculture	153	127	-26	-17%	20	0,0209
Tropical Moist	GA	maraichage	123	97	-25	-21%	9	0,0958
Tropical Moist	HG	arboriculture	87	62	-25	-29%	4	0,0698
Tropical Moist	GA	ananas	146	122	-24	-17%	9	0,0378
Tropical Dry	PA	arboriculture	58	34	-24	-42%	5	0,0334
Tropical Wet	GA	ananas	123	100	-23	-19%	7	0,1002
Tropical Moist	GA	arboriculture	134	112	-23	-17%	14	0,1076
Tropical Moist	GH	ananas	119	97	-22	-19%	15	0,0490
Tropical Dry	HF	prairie	80	100	20	26%	5	0,0511
Tropical Dry	HH	arboriculture	93	116	23	25%	12	0,0588



La typologie des usages semble à revoir pour certains grands types comme l'arboriculture pour laquelle souvent le sol est cultivé en maraîchage en attendant que les arbres fruitiers couvrent l'ensemble du sol par leur ombrage ; autrement dit les pratiques arboricoles peuvent s'apparenter soit à des pratiques maraîchères (lorsque les arbres sont jeunes) ou soient à des pratiques petites prairies (lorsque les arbres sont à maturité). Ceci pourrait expliquer les valeurs extrêmes de variations de stock de C observées dans le Tableau 6).



**Figure 30 : Moyenne des différences de stock de Csol (MgC ha-1) selon climat et type de sols, tous changements d'usages confondus (la valeur entre parenthèses correspond au nombre de buffers)**

La Figure 30 présente les moyennes des différences de stocks entre autres usages et canne à sucre soit par type de climat soit par type de sol. Le déstockage du carbone du sol semble être en relation avec la pluviosité puisqu'il est deux fois plus important dans les milieux très humides (tropical wet) que sous une pluviosité plus faible (tropical dry), ce quel que soit le mode d'usage alternatif à la référence.

Pour les types de sols, ce sont également les sols des régions humides (A2, AG) qui sont les plus sensibles ; ce sont ceux qui ont les stocks les plus élevés sous canne à sucre et donc ceux pour lequel le déstockage du carbone du sol lié à un changement d'usage sera le plus important. Les évolutions de stockage et déstockage pour les sols HV et HH présentés ici sont à relier à la nature du mode d'usage en cause (arboriculture, voir paragraphe précédent).

Les deux méthodes d'évaluation de l'impact des modes d'usage sur les stocks de carbone du sol (mesures sur le terrain et analyse spatialisée à partir d'une base de données) permettent de soutenir les mêmes hypothèses sur les déterminants des stocks de carbone du sol : stocks de carbone élevés liés à la nature minéralogique des sols et moindre stock quand l'usage est de type maraîchage.

Ces valeurs de stocks de carbone du sol seront utilisées dans la partie 'Bilan de gaz à effet de serre' comme facteur d'émission de type Tier 2 pour le compartiment sol, dans le calculateur Ex-ACT utilisé pour l'évaluation des bilans émissions-stockages des GES à l'échelle du terroir agricole réunionnais.

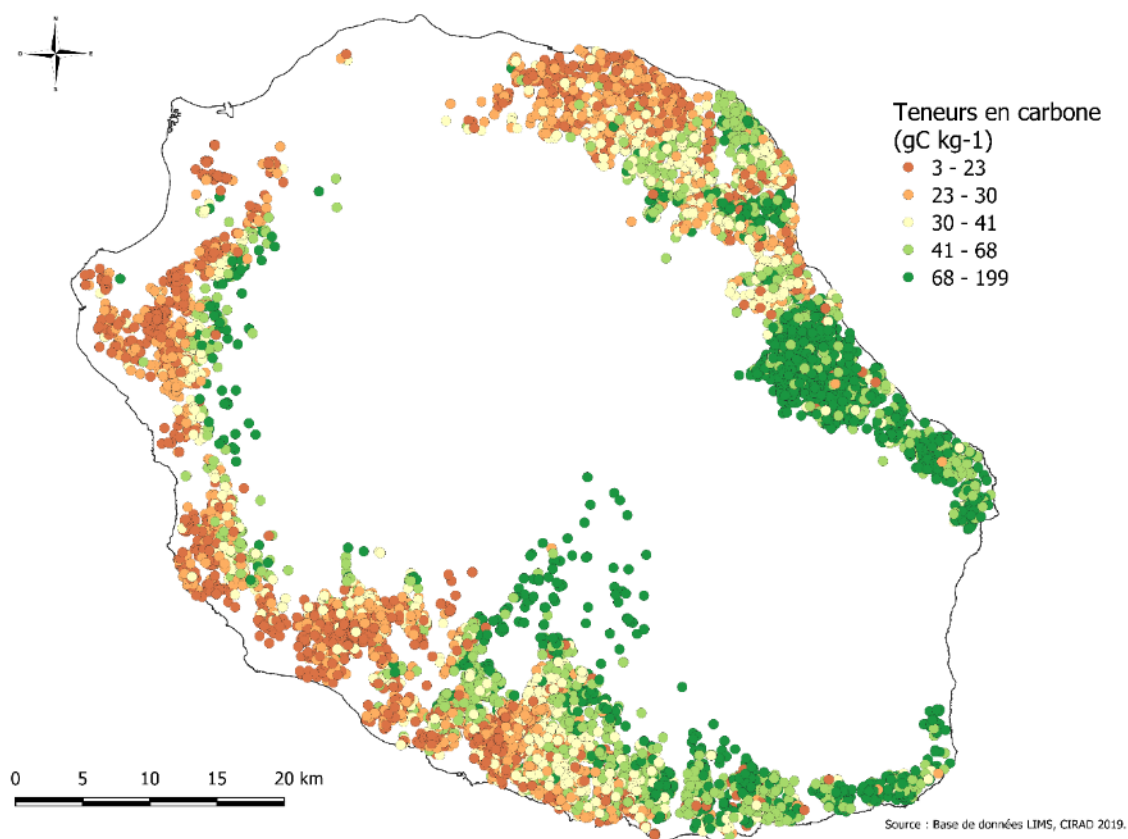
### 3.3.3. Les stocks de carbone du sol : prédictions et spatialisation

Près de 10 000 analyses de sol géoréférencées, décrites dans le paragraphe 3.1.1., dont la teneur en carbone est renseignée (Figure 31) ont été utilisées pour évaluer les stocks de carbone des sols agricoles de La Réunion. Les sols agricoles réunionnais présentent des teneurs en carbone variant de 3 à 200 gC kg-1 et une moyenne de 45 gC kg-1.

Une intersection spatiale de ces analyses de sol, comprenant notamment la teneur en carbone et le mode d'usage, avec les unités pédologiques définies à partir d'informations spectrales a permis de répartir les analyses de sol selon ces deux modalités : unité pédologique et mode d'usage.

Rappelons que l'obligation d'une analyse de sol à la replantation de la canne à sucre pour l'obtention de subventions européennes explique le nombre conséquent d'analyses de sol pour la canne à sucre comparativement aux faibles nombres d'analyses de sol pour les autres modes d'usage.

Les densités apparentes ont été prédites, à partir des modèles présentés en 3.3.1., sur les spectres MIR ayant permis de définir les unités pédologiques (§3.2.2.) avant d'être moyennées par unité pédologique puis attribuées à chaque analyse de sol (Figure 31).



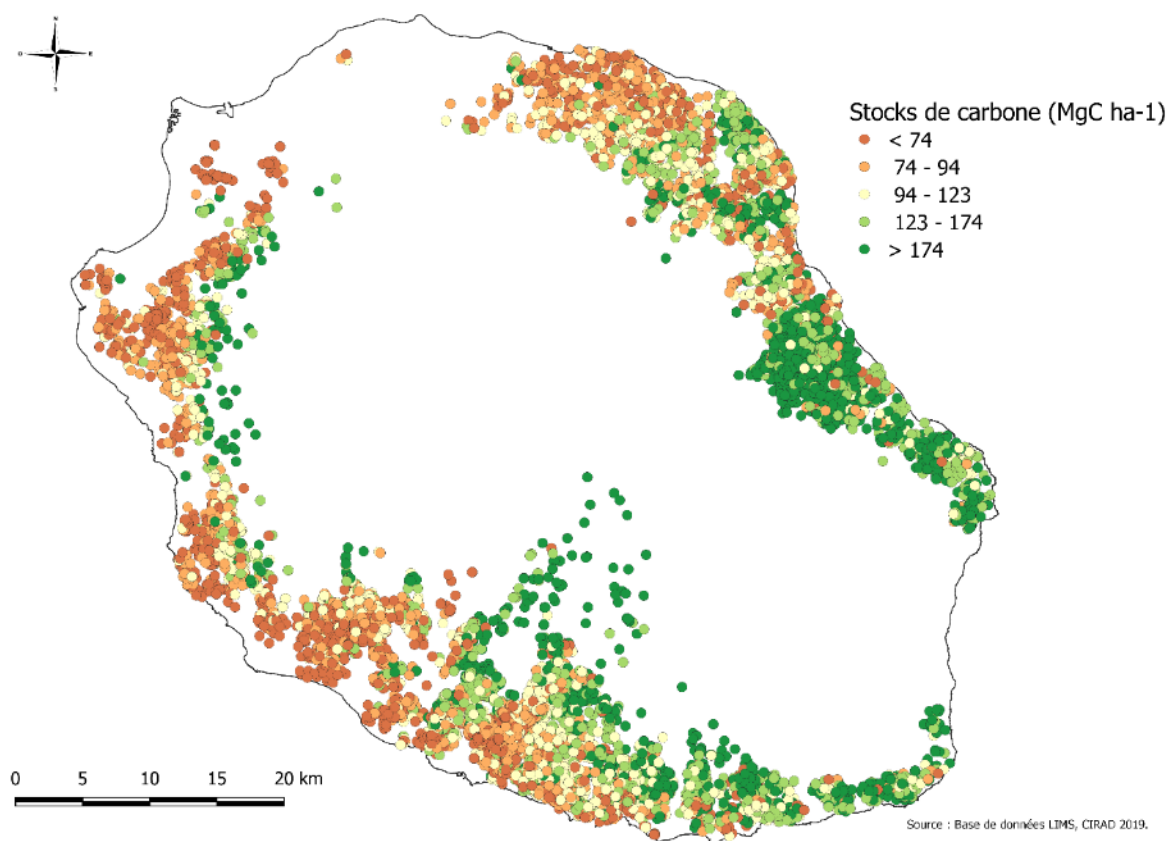
**Figure 31 : Carte des teneurs en carbone**

Pour chaque analyse de sol sur 0-30 cm de profondeur, la teneur en carbone provenant de l'analyse de sol et la densité apparente associée à l'unité pédologique permettent de calculer le stock de carbone du sol d'après l'équation suivante :

$$\text{Stock de Csol (MgC/ha)} = \text{teneur en Carbone(g/100g)} \times \text{Da(g/cm}^3\text{)} \times \text{épaisseur (30cm)}$$

Les stocks de carbone du sol ainsi obtenus (Figure 32) sont élevés et présentent une variabilité importante avec autant de stocks inférieurs à 74 MgC ha<sup>-1</sup> que de stocks supérieurs à 174 MgC ha<sup>-1</sup>.

La répartition spatiale des stocks de carbone recoupe la typologie des sols simplifiée avec des stocks plus faibles dans des sols bruns et ferralitiques alors que les stocks les plus élevés se retrouvent dans les Andosols des Hauts et sur le massif, plus jeune, du Piton de La Fournaise.



**Figure 32 : Carte des stocks de carbone**

Pour chaque unité pédologique et chaque mode d'usage, une teneur de carbone moyenne et un stock de carbone moyen a pu être calculé (



Tableau 7).

Il est intéressant de noter que les 500 stocks de carbone sous canne à sucre selon la méthode des paires dans une zone tampon de 200m (méthode décrite dans le paragraphe 3.3.2) et les 8657 stocks de carbone sous canne à sucre dans l'ensemble des unités pédologiques présentent des stocks moyens par unité pédologique équivalents et une moyenne totale sous canne à sucre de 126 MgC ha<sup>-1</sup> et 125 MgC ha<sup>-1</sup>, respectivement.

Les teneurs en carbone, plus élevées dans les sols volcaniques à allophanes que dans les sols bruns et ferrallitiques à halloysite, présentent des valeurs moyennes par unité pédologique variant de 23 gC kg<sup>-1</sup> pour l'unité HV à 80 gC kg<sup>-1</sup> pour l'unité A2.

De la même manière, les sols volcaniques à allophanes (A1, A2, AA, AG et GA) présentent des stocks de carbone plus élevés que les sols à halloysite (GH, HF, HG, HH, HV). Les sols des cônes de déjections des rivières (PA), par l'apport continu de matériau depuis les hauteurs de l'île, présente des valeurs de stocks de carbone intermédiaires pour la canne à sucre.

Pour toutes les unités pédologiques, les sols sous prairies présentent les stocks de carbone organique les plus élevés, ces stocks sont plus faibles sous canne à sucre et arboriculture et diminuent sous maraichage et ananas. On peut noter la situation particulière de l'unité pédologique A2 pour laquelle le stock de carbone est plus élevé sous maraichage que sous canne à sucre. Deux facteurs peuvent expliquer ce phénomène : dans cette unité pédologique, les parcelles de maraichage se trouvent en altitude, au-delà de la zone de la canne à sucre, dans les zones de prairie. Ces sols de type andosol ayant un climat plus humide, les stocks de carbone du sol y sont plus élevés, et l'on retrouve des stocks sous maraichage plus faibles que les stocks sous prairie. De plus, la présence de bovins non loin des parcelles de maraichage suppose un accès simplifié à la matière organique et donc à des apports organiques en quantité plus importante que dans des zones qui seraient éloignées des sources de production des amendements organiques, cela étant une problématique importante à La Réunion.



**Tableau 7 : Teneurs, stocks et quantités de carbone par unité pédologique et mode d'usage à partir des 10000 points de la base de d'analyses de sol**

Unité pédo	Mode d'usage	Teneur en carbone (gC kg <sup>-1</sup> )				Stock de carbone (MgC ha <sup>-1</sup> )					Quantité de carbone et surfaces		
		Moyenne	σ	CV %	Δ teneur	Moyenne	σ	CV %	Δ stock	ANOV A	MgC	% C par usage	Surface (ha)
<b>A1</b>	Maraichage												
	Ananas	48,7	17,5	36	-4,2	133	48	36	-12	ab	1 695	0	13
	Arboriculture	45,9	19,1	42	-7,0	125	52	42	-19	a	94 795	17	756
	Canne à s	52,9	27,1	51	0,0	144	74	51	0	ab	299 722	54	2 076
	Prairie	81,9	44,8	55	29,0	223	122	55	79	a	155 191	28	694
<b>Par unité pédologique</b>		<b>52,9</b>	<b>27,2</b>	<b>51</b>		<b>145</b>	<b>74</b>	<b>51</b>			<b>551 404</b>	<b>100</b>	<b>3 539</b>
<b>A2</b>	Maraichage	82,5	24,8	30	2,2	181	54	30	5	a	192 953	8	1 068
	Ananas	74,8	27,5	37	-5,4	164	60	37	-12	a	10 055	0	61
	Arboriculture	77,6	37,0	48	-2,7	170	81	48	-6	a	457 786	20	2 695
	Canne à s	80,2	28,8	36	0,0	176	63	36	0	a	743 232	32	4 230
	Prairie	108,1	30,3	28	27,9	237	66	28	61	b	901 276	39	3 808
<b>Par unité pédologique</b>		<b>80,4</b>	<b>29,2</b>	<b>36</b>		<b>176</b>	<b>64</b>	<b>36</b>			<b>2 305 302</b>	<b>100</b>	<b>11 863</b>
<b>AA</b>	Maraichage												
	Ananas												
	Arboriculture	55,9	18,6	33	-18,4	124	41	33	-41	a	21 018	11	169
	Canne à s	74,3	24,9	34	0,0	165	55	34	0	b	162 720	89	986
	Prairie												
<b>Par unité pédologique</b>		<b>73,8</b>	<b>24,9</b>	<b>34</b>		<b>164</b>	<b>55</b>	<b>34</b>			<b>183 739</b>	<b>100</b>	<b>1 155</b>
<b>AG</b>	Maraichage	59,0	21,3	36	-5,7	156	56	36	-15	a	89 481	7	574
	Ananas	71,7	27,0	38	6,9	189	71	38	18	a	15 153	1	80
	Arboriculture	70,1	35,2	50	5,3	185	93	50	14	a	320 552	23	1 733
	Canne à s	64,7	26,9	42	0,0	171	71	42	0	a	460 821	34	2 696
	Prairie	105,5	41,8	40	40,8	279	110	40	108	b	485 212	35	1 741
<b>Par unité pédologique</b>		<b>65,7</b>	<b>28,0</b>	<b>43</b>		<b>174</b>	<b>74</b>	<b>43</b>			<b>1 371 219</b>	<b>100</b>	<b>6 825</b>
<b>GA</b>	Maraichage	35,9	18,4	51	-2,3	116	59	51	-8	a	40 235	8	346
	Ananas	33,7	16,3	48	-4,5	109	53	48	-15	a	8 852	2	81
	Arboriculture	39,7	18,5	47	1,5	129	60	47	5	a	93 785	18	729
	Canne à s	38,2	15,3	40	0,0	124	49	40	0	a	382 302	73	3 087
	Prairie												
<b>Par unité pédologique</b>		<b>38,1</b>	<b>15,4</b>	<b>40</b>		<b>124</b>	<b>50</b>	<b>40</b>			<b>525 174</b>	<b>100</b>	<b>4 243</b>
<b>GH</b>	Maraichage												
	Ananas	31,7	9,4	30	-2,7	104	31	30	-9	a	3 604	1	35
	Arboriculture	35,0	26,5	76	0,5	114	87	76	2	a	57 213	20	500
	Canne à s	34,4	13,1	38	0,0	113	43	38	0	a	228 502	79	2 030
	Prairie												
<b>Par unité pédologique</b>		<b>34,3</b>	<b>13,6</b>	<b>40</b>		<b>112</b>	<b>45</b>	<b>40</b>			<b>289 318</b>	<b>100</b>	<b>2 565</b>
<b>HF</b>	Maraichage	25,5	13,3	52	-5,7	83	43	52	-18	ab	33 570	8	406
	Ananas	21,3	9,7	46	-9,9	69	31	46	-32	a	4 220	1	61
	Arboriculture	32,3	23,4	72	1,1	105	76	72	4	ab	80 135	20	765
	Canne à s	31,2	15,5	50	0,0	101	50	50	0	b	247 229	61	2 445
	Prairie	33,4	9,4	28	2,2	108	31	28	7	b	38 774	10	358
<b>Par unité pédologique</b>		<b>31,0</b>	<b>15,4</b>	<b>50</b>		<b>100</b>	<b>50</b>	<b>50</b>			<b>403 928</b>	<b>100</b>	<b>4 035</b>
<b>HG</b>	Maraichage	25,1	5,9	23	-4,1	81	19	23	-13	a	48 279	11	594
	Ananas	28,6	8,5	30	-0,6	93	28	30	-2	ab	7 306	2	79
	Arboriculture	28,2	19,2	68	-1,0	91	62	68	-3	ab	68 212	15	746
	Canne à s	29,2	10,0	34	0,0	95	32	34	0	a	282 674	62	2 989
	Prairie	40,7	22,2	54	11,5	132	72	54	37	b	45 999	10	349
<b>Par unité pédologique</b>		<b>29,2</b>	<b>10,2</b>	<b>35</b>		<b>95</b>	<b>33</b>	<b>35</b>			<b>452 469</b>	<b>100</b>	<b>4 756</b>
<b>HH</b>	Maraichage	21,9	4,5	20	-2,3	74	15	20	-8	ab	33 649	10	457
	Ananas	19,7	3,9	20	-4,5	66	13	20	-15	a	4 432	1	67
	Arboriculture	27,0	14,6	54	2,7	91	49	54	9	b	93 265	28	1 030
	Canne à s	24,2	7,9	33	0,0	81	26	33	0	b	206 033	61	2 531
	Prairie												
<b>Par unité pédologique</b>		<b>24,0</b>	<b>7,9</b>	<b>0</b>		<b>81</b>	<b>27</b>	<b>0</b>			<b>337 379</b>	<b>100</b>	<b>4 085</b>
<b>HV</b>	Maraichage	16,8	13,2	78	-8,2	56	44	78	-27	a	14 221	10	256
	Ananas	19,0	5,6	29	-6,0	63	18	29	-20	a	1 688	1	27
	Arboriculture	16,6	6,9	42	-8,4	55	23	42	-28	a	39 289	28	717
	Canne à s	25,0	10,3	41	0,0	83	34	41	0	b	87 324	61	1 058
	Prairie												
<b>Par unité pédologique</b>		<b>23,3</b>	<b>10,5</b>	<b>45</b>		<b>77</b>	<b>35</b>	<b>45</b>			<b>142 522</b>	<b>100</b>	<b>2 058</b>
<b>PA</b>	Maraichage	18,6	14,5	78	-22,2	53	41	78	-63	a	12 548	5	239
	Ananas	19,6	7,3	37	-21,2	55	21	37	-60	a	748	0	13
	Arboriculture	19,9	8,7	44	-21,0	56	24	44	-59	a	30 697	13	548
	Canne à s	40,8	20,1	49	0,0	115	57	49	0	b	191 225	81	1 661
	Prairie	0,0											
<b>Par unité pédologique</b>		<b>39,3</b>	<b>20,3</b>	<b>52</b>		<b>111</b>	<b>57</b>	<b>52</b>			<b>235 217</b>	<b>100</b>	<b>2 460</b>

Les stocks de carbone des sols de La Réunion varient de 53 à 279 MgC ha<sup>-1</sup> avec un stock moyen, sols et usages confondus, de 125 MgC ha<sup>-1</sup>. Ces valeurs, bien que certainement sur-estimés par la non prise en compte systématique des éléments grossiers, sont élevées.

A titre de comparaison, les sols de la Martinique présentent également des stocks de carbone compris entre 30 et 200 MgC ha<sup>-1</sup> (Blanchart and Bernoux, 2005). En France métropolitaine, l'étendue des stocks de carbone est du même ordre de grandeur qu'en Martinique avec un stock moyen de 53 MgC ha<sup>-1</sup> (Tosser et al., 2014) ou 43 MgC ha<sup>-1</sup> (Arrouays et al., 2003) selon les études.

Les stocks de carbone des sols de type andosols de La Réunion (A1, A2, AA, AG) sont compris entre 145 et 176 MgC ha<sup>-1</sup> alors que les stocks de carbone des andosols en Martinique varient de 26 à 78 MgC ha<sup>-1</sup>, avec une moyenne de 51 MgC ha<sup>-1</sup> (Blanchart and Bernoux, 2005). A contrario, les sols bruns à halloysite de la Martinique semblent avoir des stocks de carbone plus élevés variant de 35 à 77 MgC ha<sup>-1</sup>, avec une moyenne de 48 MgC ha<sup>-1</sup> alors que les sols à halloysite (HF, HG, HH) de La Réunion ont des stocks de carbone compris entre 24 et 31 MgC ha<sup>-1</sup>.

Pour l'ensemble des analyses de sol, les  $\Delta$ stocks entre la canne à sucre et les autres modes d'usages indiquent des stocks de carbone plus élevés sous prairies et des stocks de carbone plus faibles en maraichage et ananas. L'arboriculture présente un stock de carbone moyen légèrement supérieur à celui de la canne à sucre. Une analyse de variance a permis de comparer les moyennes des teneurs et stocks de carbone par unité pédologique et mode d'usage ; les premiers résultats montrent des différences significatives de stocks de carbone moyens entre la canne à sucre (125 MgC ha<sup>-1</sup>), la prairie (191 MgC ha<sup>-1</sup>), et les autres modes d'usages (Tableau 8).

**Tableau 8 : Moyennes des teneurs, stocks et quantités de carbone par mode d'usage**

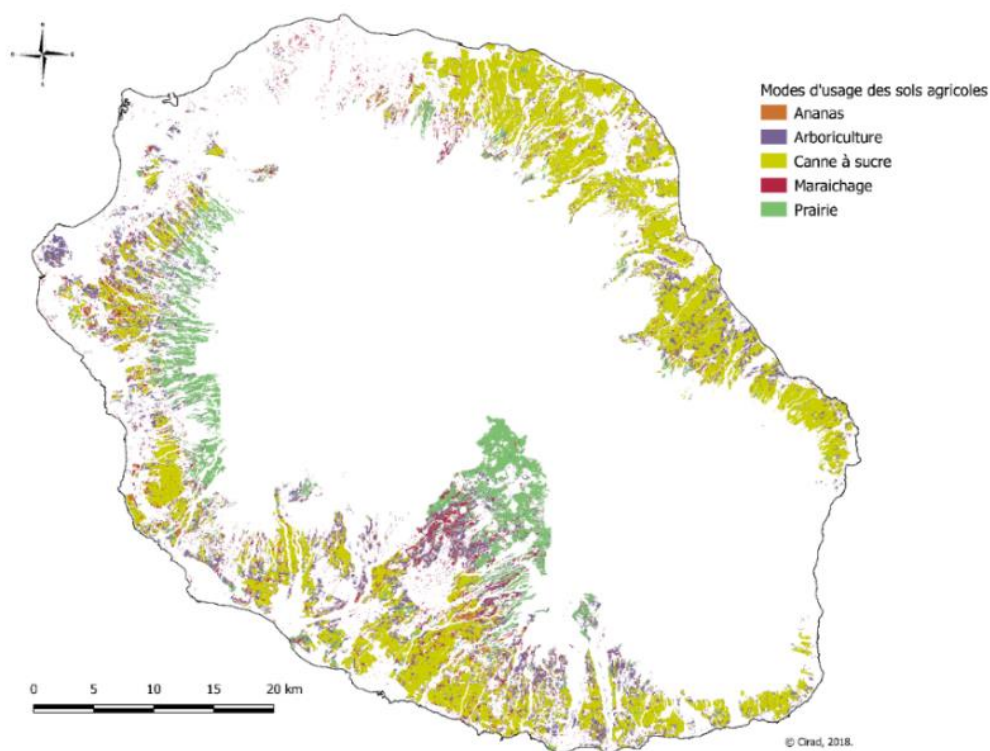
Mode d'usage	Teneur en carbone (gC kg <sup>-1</sup> )				Stock de carbone (MgC ha <sup>-1</sup> )					Quantité de carbone et surfaces		
	Moyenne	ET	CV %	$\Delta$ teneur	Moyenne	ET	CV %	$\Delta$ stock	Anova	MgC	% C par usage	Surfaces (ha)
<b>Maraichage</b>	45,2	32,2	71	0,1	117	69	59	-8	a	464 935	7	3 941
<b>Ananas</b>	41,5	29	7	-3,5	114	66	58	-10	a	57 752	1	517
<b>Arboriculture</b>	47,3	34,9	74	2,2	126	84	66	1	a	1 356 748	20	10 388
<b>Canne à sucre</b>	45,0	27,7	62	0,0	125	63	50	0	b	3 291 783	48	25 790
<b>Prairie</b>	73,7	44,6	60	28,7	191	102	53	66	c	1 626 453	24	6 950

La comparaison entre les stocks de carbone sous canne à sucre entre la Martinique et La Réunion est également intéressante avec une variation de 44 MgC ha<sup>-1</sup> dans les sols bruns à halloysite à 57 MgC ha<sup>-1</sup> dans les andosols martiniquais (Blanchart and Bernoux, 2005) contre une variation de stocks de carbone allant de 81 MgC ha<sup>-1</sup> dans les sols à halloysite (HH) jusqu'à 176 MgC ha<sup>-1</sup> dans les andosols (A2) sous canne à sucre à La Réunion.

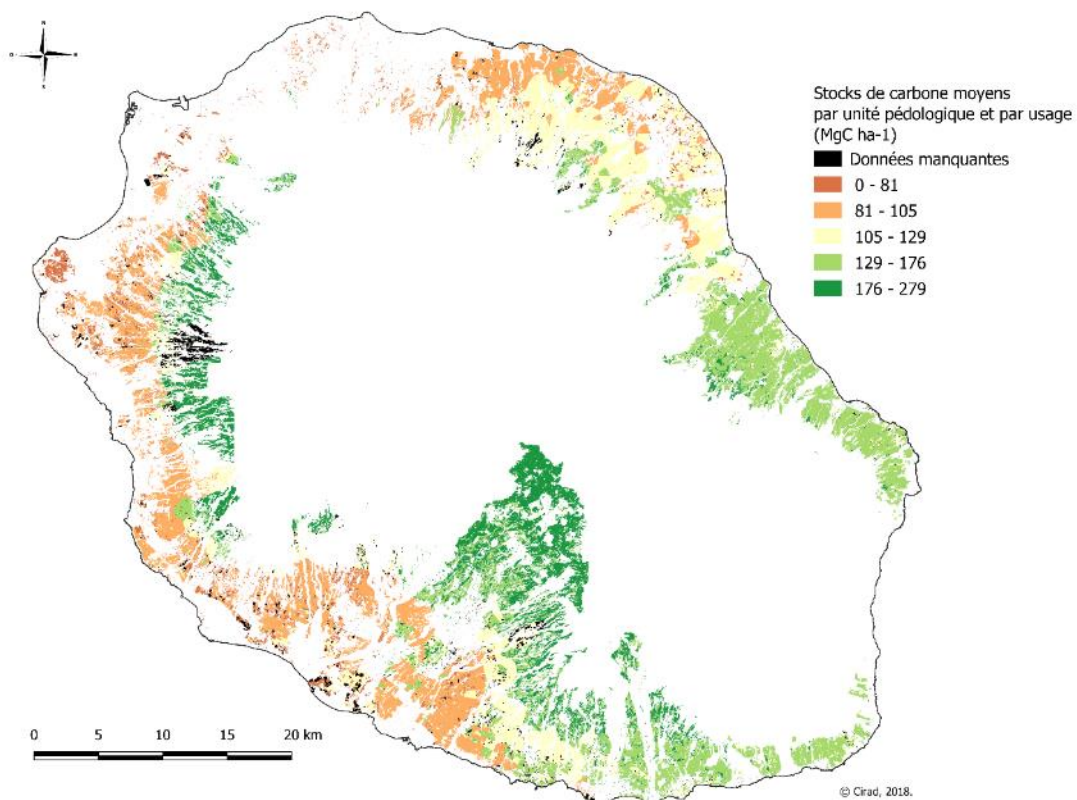
Ces stocks de carbone moyens ont ensuite été affectés aux usages agricoles (Figure 33) selon leur caractéristique pédologique et leur mode d'usage (



Tableau 7) afin de spatialiser les stocks de carbone des sols agricoles réunionnais (Figure 34).

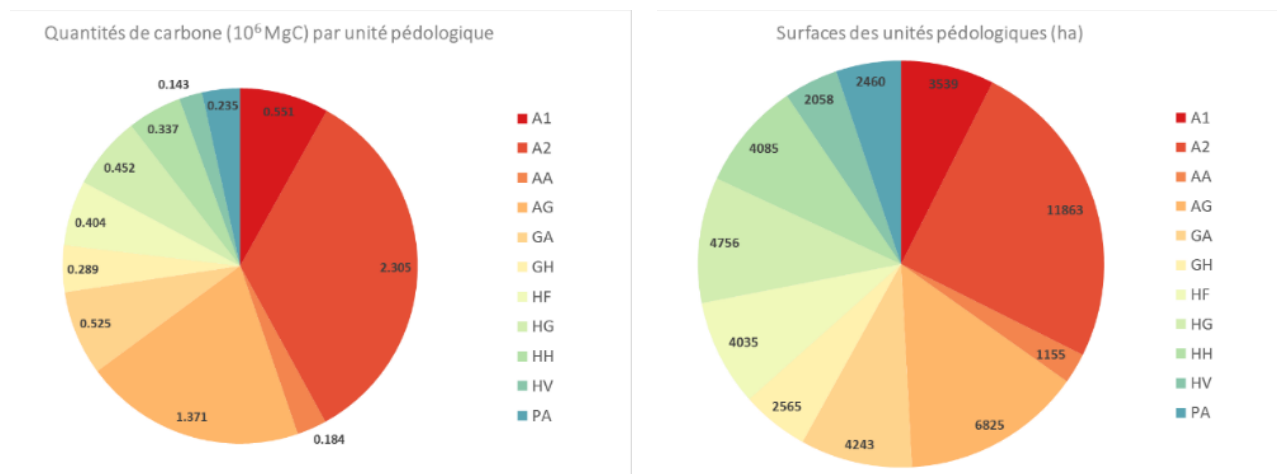


**Figure 33 : Carte d'occupation du sol**  
([http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Abd\\_gabir\\_2017\\_v2\\_2](http://aware.cirad.fr/layers/geonode%3Abd_gabir_2017_v2_2))



**Figure 34 : Carte des stocks de carbone des sols agricoles de La Réunion**

Au total, les sols agricoles de La Réunion ont un stock de carbone de 6.8 millions de tonnes de carbone sur 0-30cm de profondeur pour une surface de 47 585 ha. Toutefois, ce calcul ne prend en compte que les surfaces agricoles pour lesquelles un stock moyen de carbone a pu être renseigné, cela représente 96.6 % de la surface agricole. En effet, 1664 ha sur les 49249 ha de surface agricole considérée dans cette étude n'ont pas de stock moyen de carbone selon leur unité pédologique et leur mode d'usage en raison d'un nombre insuffisant d'analyses de sol. Cela représente 3.4 % de la surface agricole pour laquelle aucun stock de carbone n'a pu être renseigné.



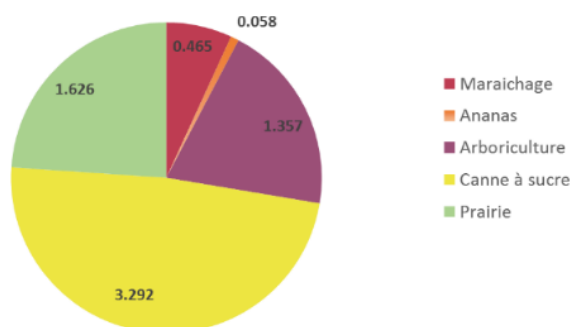
**Figure 35 : Répartition des quantités de carbone (MgC) et des surfaces par unité pédologique**

Le carbone contenu dans les trente premiers centimètres des andosols (A1 + A2 + AA + AG) représente 65 % du carbone des sols et 48 % des surfaces du terroir agricole (Tableau 9 et Figure 35). Les sols à halloysite représentent l'autre part importante du carbone du sol (23%) sur 20% des surfaces agricoles tandis que les sols à gibbsite (GA +GH) représentent 13% de la quantité de carbone du sol pour 14% des surfaces. Les autres sols (PA pour sols peu évolués d'apport), sols des cônes de déjections des rivières, s'étendent sur 5% des surfaces pour une quantité de carbone représentant 3% du total.

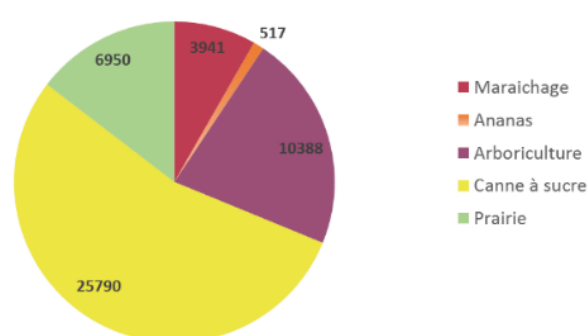
**Tableau 9 : Masse de carbone du sol (en MgC) selon le type de sol et surface des sols**

Type de sol	Masse de C (MgC)	% C	Surface (ha)	% Surf.
A1	551 404	8	3 539	7
A2	2 305 302	34	11 863	25
AA	183 739	3	1 155	2
AG	1 371 219	20	6 825	14
GA	525 174	8	4 243	9
GH	289 318	4	2 565	5
HF	403 928	6	4 035	8
HG	452 469	7	4 756	10
HH	337 379	5	4 085	9
HV	142 522	2	2 058	4
PA	235 217	3	2 460	5
Total	6 797 671		47 585	



Quantités de carbone (10<sup>6</sup> MgC) par mode d'usage

Surfaces par mode d'usage (ha)

**Figure 36 : Répartition des quantités de carbone (MgC) et des surfaces par mode d'usage**

La canne à sucre, base du système agricole réunionnais, 54% du territoire selon les données d'occupation du sol issues de la télédétection, représente près de la moitié de la quantité totale de carbone du terroir agricole (48%). Quant aux prairies, elles stockent 24% du carbone pour seulement 15% de la surface agricole. Pour les autres modes d'usages, la part de la quantité totale de carbone équivaut aux pourcentages des surfaces occupées (Figure 36 et Tableau 10).

A noter que les surfaces présentées ici sont les surfaces pour lesquelles des quantités de carbone ont pu être définies et expliquent l'écart entre les pourcentages de surfaces attribués aux modes d'usages avec les chiffres issus de la base d'occupation du sol fournie par la DAAF.

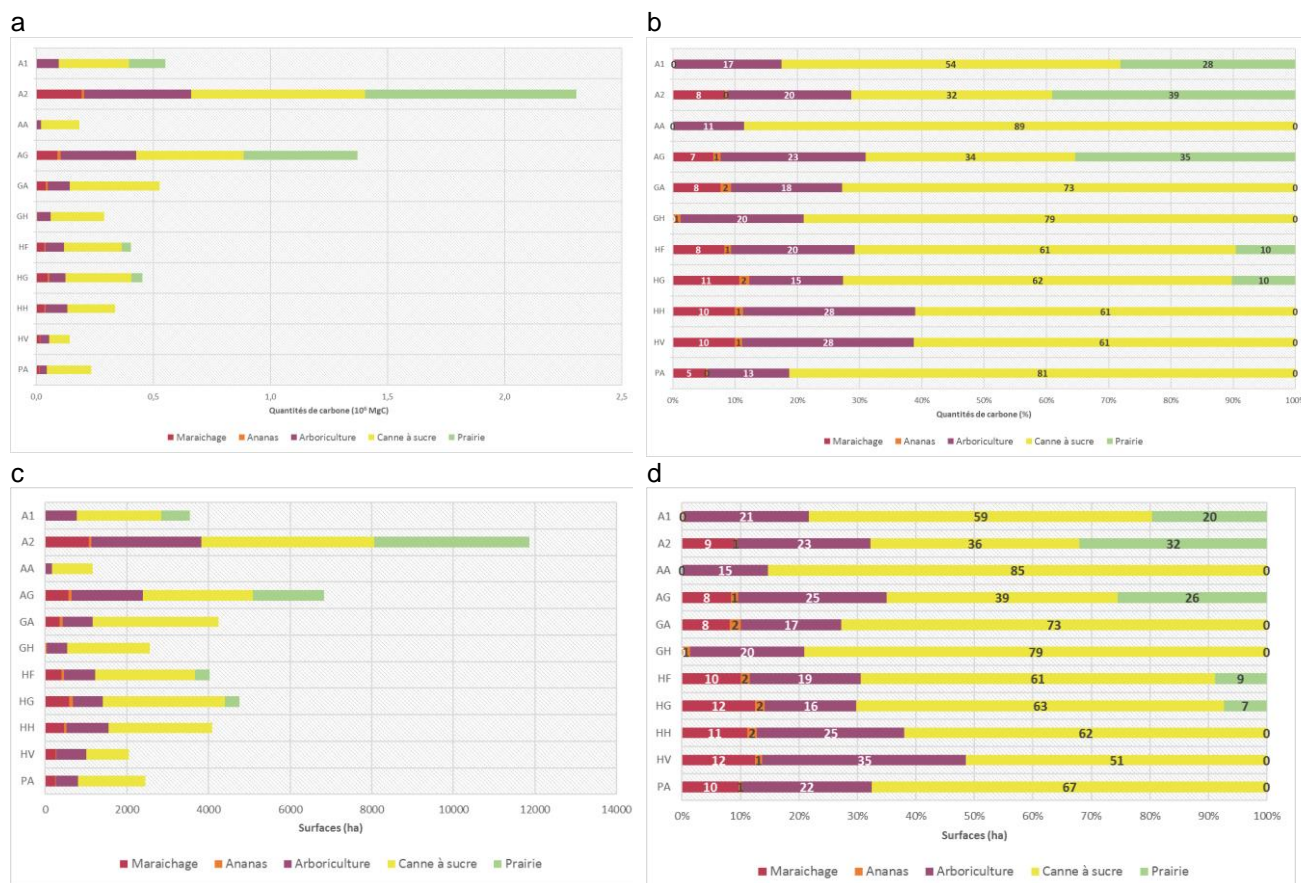
**Tableau 10: Masse de carbone du sol (en MgC) selon le mode d'usage et surface des modes d'usage**

Usages	Masse de C (MgC)	% C	Surface (ha)	% Surf.
Maraichage	464 935	7	3 941	8
Ananas	57 752	1	517	1
Arboriculture	1 356 748	20	10 388	22
Canne à sucre	3 291 783	48	25 790	54
Prairie	1 626 453	24	6 950	15
Total	6 797 671		47 585	

Deux unités pédologiques, A2 et AG, contribuent à plus de la moitié des quantités totales de carbone du sol (Tableau 9, Figure 37a) en raison de leurs surfaces élevées, majoritairement en canne à sucre (32% et 34% respectivement) et en prairie (39% et 35%) (Figure 37d).

Cependant, les unités A2 et AG présentent des différences de stocks de l'ordre de -40 MgC ha<sup>-1</sup> entre la canne à sucre et d'autres usages (voir § 3.3.2), voire supérieur entre la prairie et les autres usages (Tableau 1). Ces caractéristiques font de ces sols à la fois des « hotspots » de carbone contribuant fortement aux quantités totales de carbone sur l'île et des sols dont les stocks de carbone sont les plus vulnérables à des changements d'usages (voir § 3.3.2). En effet, une augmentation importante de surfaces en maraichage, ananas ou arboriculture au détriment de la canne à sucre ou de la prairie pourrait se traduire par un déstockage massif de carbone du sol. De tels scénarios, selon le type de changement d'usage et les surfaces impactées entre ces trois modes d'usages des terres, seront testés dans le cadre des bilans GES (voir § 3.5)..

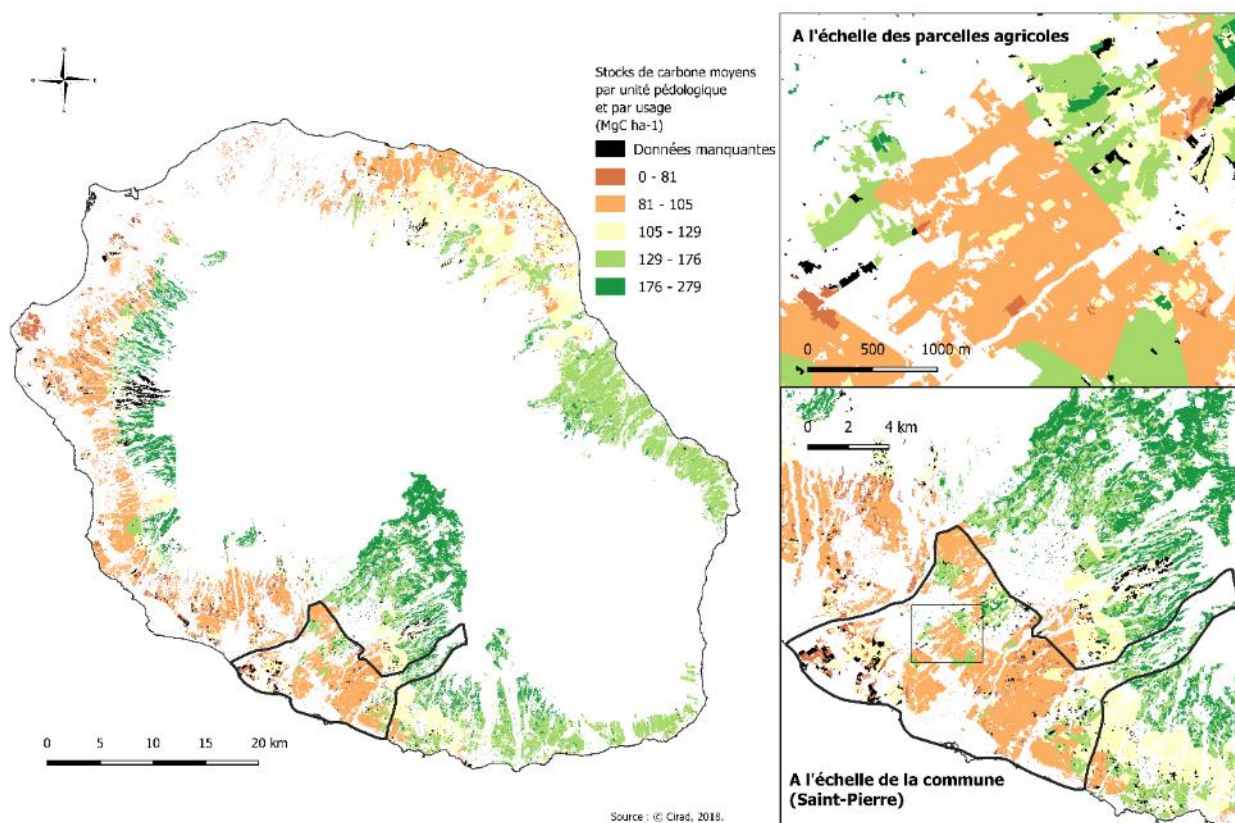




**Figure 37 : Répartition des quantités de carbone (MgC) (8a et 8b) et des surfaces (8c et 8d) par mode d'usage pour chaque unité pédologique**

La présence d'une base de données d'analyses issue du laboratoire de CIRAD de La Réunion aussi conséquente, couplée à une approche spatiale des données carbone a permis de réaliser une cartographie des stocks de carbone sur l'ensemble de la surface agricole de l'île. Les deux premiers déterminants du carbone du sol à La Réunion étant le type de sol et le mode d'usage, le territoire a été découpé selon l'occupation du sol, issue de données de télédétection et d'unités pédologiques, définies à partir d'information spectrale, afin de pouvoir calculer des stocks de carbone moyens cohérents selon ces deux variables.

La spatialisation permet ainsi de représenter les stocks de carbone du sol à l'échelle des parcelles agricoles et par suite, de pouvoir visualiser ces données à l'échelle souhaitée (commune, terroir ou à l'ensemble de l'île) par l'utilisateur potentiel (Figure 38).



**Figure 38 : Carte des stocks de carbone des sols agricoles de La Réunion à différentes échelles spatiales**

### 3.4. Facteurs d'émission de GES in situ

#### 3.4.1. Objectif

Il s'agit d'estimer les valeurs des facteurs d'émission des principales cultures de La Réunion : canne à sucres et prairies, spécifiques au contexte local (niveau Tier 2) en lien avec les pratiques de coupe/réimplantation des cultures et les modes de fertilisation. Pour cela des expérimentations ont été menées dans différentes parcelles agricoles où ont été mesurées les émissions de GES ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) selon différentes modalités de fertilisation. Les émissions de  $\text{CH}_4$  sur parcelles non inondées sont négligeables et ne sont pas incluses dans les actions de la tâche.

#### Emissions sur parcelles prairiales

La majorité des bovins élevés sur l'île est nourrie à l'aide de fourrages verts ou ensilés ainsi que de fourrages secs. Le pâturage n'est possible que dans les exploitations de grande taille. A l'inverse, la quasi-totalité des systèmes allaitants sont constitués de prairies permanente, avec des vaches allaitantes au pâturage toute l'année. De par ses nombreux microclimats, l'île a la particularité de compter différents types de prairies.

A faible altitude, nous rencontrons des prairies tropicales, composées d'espèces telles que *chloris gayana* ou *brachiaria decumbens*, alors qu'en altitude, au-delà de 1000 m, où le climat est plus tempéré, il est possible de rencontrer des prairies mixtes où se mêlent espèces tempérées comme le ray-grass (*Lolium perenne*) ou le dactyle (*Dactylis glomerata*) et des espèces tropicales comme le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). Permanentes ou temporaires, fauchées ou pâturées, l'usage des prairies est multiple. Dans le cadre de cette étude, ce sont les prairies permanentes sur lesquelles nous nous focaliserons.

Les 2 sites expérimentaux retenus pour cette tâche se situent sur le littoral et à 1600 m d'altitude. Ils sont représentatifs de la diversité agro-écologique des prairies tropicales à la Réunion (altitude, contexte pédoclimatique, espèce fourragères, type de sol). Le dispositif expérimental est constitué de trente micro parcelles, divisées en trois blocs complets, sur lesquelles sont testées, depuis 2004, dix modalités de fertilisation (témoin non fertilisé, engrais minéral, compost de fumier de bovin, lisier de bovin, associations d'engrais minéral et organique). Les mesures d'émissions de GES seront menées simultanément sur les 2 sites, sur les parcelles des traitements « témoin 0 fertilisant », « ammonitrate », « compost de fumier de bovin », et « lisier de bovin ».

### Emissions sur parcelles en canne à sucre

Les travaux menés par plusieurs unités du CIRAD à la Réunion sur l'étude des cycles biogéochimiques sont à l'origine de plusieurs essais de terrain conduits sur le moyen et le long-terme dans diverses conditions pédoclimatiques (Ex : Système d'Observation et d'Expérimentation long terme pour la Recherche en Environnement concernant les Produits Résiduels Organiques – SOERE-PRO), complété par un réseau d'expérimentations multi-localisées (3 sites principaux et 6 sites secondaires). Parmi ces essais, 2 parcelles ont été identifiées pour tester deux modalités de fertilisation, apport de N minéral et apport de lisier de porc, et 1 mode de gestion (coupe en repousse). Dans chaque parcelle, chaque séquence de mesure est effectuée à l'aide de chambres statiques, en séquence de détermination de 5 jours (J-2, J1, J5, J10, J30...), autour de la période de la coupe ou autour du labourage. La procédure analytique est la même que celle utilisée pour les prairies.

### 3.4.2. Matériel et méthodes

#### 3.4.2.1. La méthode des chambres statiques

La méthode de mesure retenue est celle des chambres statiques car : 1- l'essai se déroule sur une petite surface car il s'agit de micro-parcelles, il est donc intéressant d'obtenir des résultats relativement précis, et 2- ne disposant pas d'analyseur de gaz en temps réel il n'était pas possible d'utiliser des chambres dynamiques.

Le couvercle de la chambre statique inclut un septum grâce auquel des échantillons de gaz sont prélevés et insérés dans des tubes hermétiques et scellés. Ces échantillons seront ensuite analysés en laboratoire, généralement par la chromatographie en phase gazeuse (CPG) (Hergoualc'H, 2008). L'échelle de temps appropriée dépasse rarement 90 minutes pour qu'un microclimat ne se crée pas à l'intérieur de l'enceinte (Rochette, 2011). Ainsi, les concentrations en gaz émis sont calculées grâce au temps et au volume de l'enceinte. Il s'agit d'une méthode utilisée à petite échelle qui permet de mesurer des quantités de gaz à l'échelle du  $\text{mgN/m}^2/\text{s}$  (Sitaula et al., 2000) ou du  $\text{gN/ha/j}$ .

Les chambres, ou cloches, se composent de trois parties (Figure 39). L'embase est enfoncée dans le sol à environ 8-10 cm de profondeur. Elle reste en place tout au long de l'étude et nécessite d'être mise en place plusieurs semaines avant le début des mesures de façon à ce que le sol et les systèmes racinaires soient totalement reformés autour de celle-ci. Dans le cas contraire, l'étanchéité du système ne sera pas garantie, l'air pouvant circuler au niveau de la partie inférieure de l'embase, et des pertes pourront survenir lors des prélèvements. Un manchon vient s'insérer sur l'embase. Il est amovible et doit être mis en place au début de la mesure et retiré à l'issue des prélèvements. Il a une hauteur de 20 cm et, comme l'ensemble des éléments de la cloche, est peint en blanc pour limiter les effets du rayonnement solaire (albedo) et tout effet de serre au sein du dispositif de mesure. Enfin, le bouchon s'insère sur le manchon et comprend plusieurs éléments : un septum pour prélever les gaz tout en gardant la chambre hermétique, un ventilateur (à l'intérieur de la cloche) pour homogénéiser le mélange gazeux avant le prélèvement ainsi qu'un système électrique permettant au ventilateur de fonctionner. Au total, le dispositif mesure 35 cm de haut et 25 cm de diamètre pour un volume de 20 litres. Une telle hauteur permet de pouvoir réaliser les mesures sans complications liées à la hauteur de l'herbe. Il est important que chaque chambre contienne le même volume et donc que chacun des composants de celle-ci respecte les dimensions souhaitées.

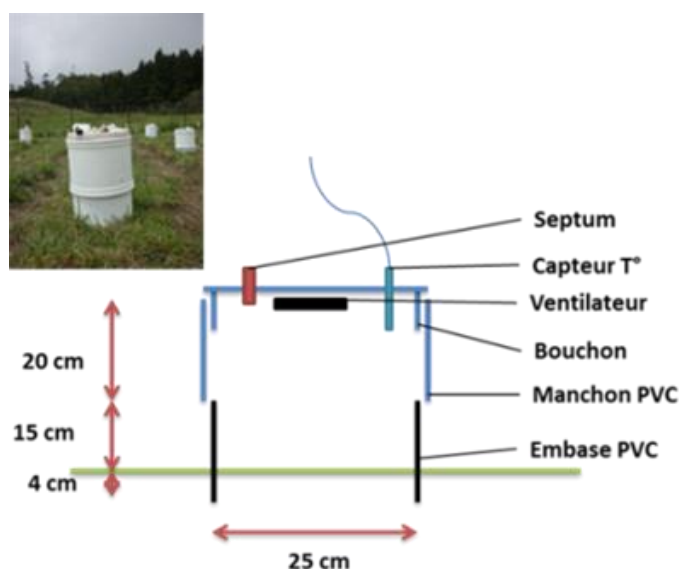


Figure 39 : Schéma de chambre statique



### 3.4.2.2. Sites d'étude et dispositifs expérimentaux

#### Parcelles prairiales

Les mesures ont été réalisées sur le site de la ferme de la SICALAIT (Société d'Intérêt Collectif Agricole en charge de la production de lait de l'île) et sur le site de la ferme de la SEDAEL (Société d'Etude de Développement et d'Amélioration de l'Élevage). Un essai long terme a été mis en place à la Réunion entre 2005 et 2018 dans ces deux sites pour évaluer les effets à long terme de différents types de fertilisation (10 traitements au total, organiques, minérales, mixtes, différents niveaux d'apports de N) sur le rendement fourrager, la composition floristique et la composition des sols, pour trois espèces de graminées fourragères différentes, tempérées (Ray-Grass/Dactyle) et tropicales (kikuyu). Nous disposons ainsi de chroniques sur la production de biomasse de graminées tempérées et tropicales et la composition des sols prairiaux sur près de 13 années. Le Tableau 11 rassemble les principales caractéristiques des sites.

**Tableau 11 : Caractéristiques des sites de mesures d'émission de GES**

Site	Localisation	Altitude (m)	Climat		Type de sol	Espèce fourragère
			Température (°C)	Pluviométrie (mm)		
SICALAIT	Bourg Murat, Plaine des Cafres	1600	14	1500-2000	Andosol perhydraté	Ray-Gras, dactyle,
SEDAEL	Mont Vert les Hauts	800	19	1000-1500	Andosol non perhydraté	Kikuyu

Dix traitements différents ont été appliqués sur les micro-parcelles (Tableau 12). Dans le cadre de ce projet, notre attention s'est portée sur les traitements 1 ; 2 ; 3 et 8 : le témoin, la fertilisation minérale, la fertilisation organique (lisier) et la fertilisation organique (compost). Les traitements mixtes ont été écartés au profit des traitements « purs » avec des quantités habituellement utilisées par les éleveurs au quotidien. Le dispositif expérimental est décrit dans la Figure 40.

**Tableau 12 : Détail des différents traitements de l'essai fertilisation ; en gras les modalités utilisées pour la mesure des émissions de GES**

Traitement	Détail des apports à l'hectare	Apports théoriques		
		N	P	K
<b>T1</b>	<b>0 fumure</b>	0	0	0
<b>T2</b>	<b>70 unités d'azote (engrais minéral) par coupe + 120U P + 80U K (en deux fois = à chaque début de saison)</b>	440	120	80
<b>T3</b>	<b>40 m³/ha de lisier par coupe soit 28 litres/parcelle</b>	720	454	958
<b>T4</b>	40 m³/ha de lisier par coupe + 30 unités d'azote (engrais minéral) par coupe soit 60 g/parcelle	910	454	958
<b>T5</b>	70 m³/ha de lisier par coupe soit 28 litres	1260	794	1676
<b>T6</b>	7,2 t/ha de compost par coupe alternée soit 4.8 kg/parcelle	350	136	331
<b>T7</b>	7,2 t/ha de compost par coupe alternée + 48 kg d'engrais minéral par coupe soit 112 g	700	136	331
<b>T8</b>	<b>12 t de compost par coupe alternée</b>	580	227	552
<b>T9</b>	12 t de compost par coupe alternée + 48 kg d'engrais minéral par coupe soit 96 g/parcelle	880	227	552
<b>T10</b>	120 kg d'azote (240 g) (engrais minéral) par coupe, 120U P (39 g) et 80U K (32 g) (en deux fois)	760	120	80

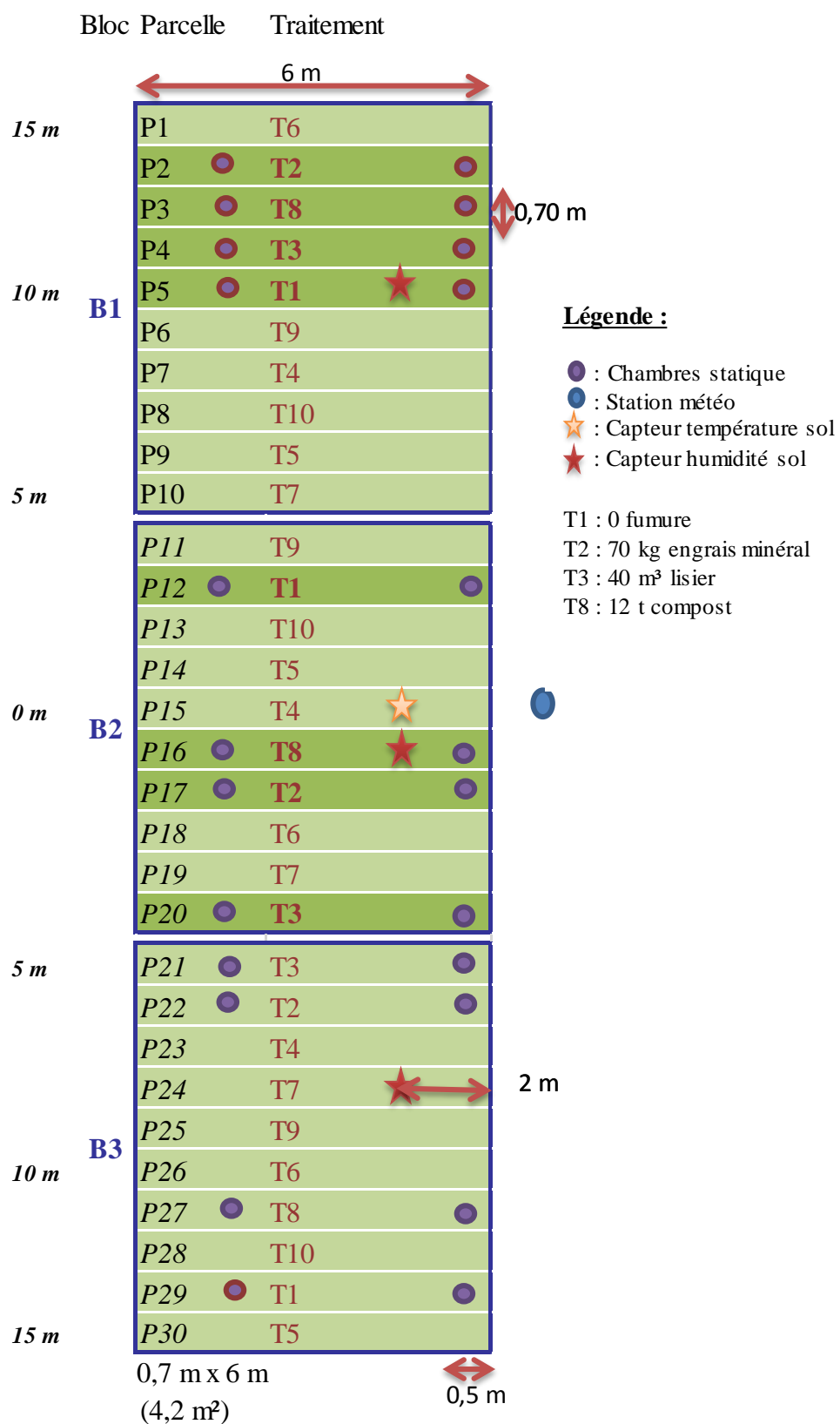


Figure 40 : Dispositif expérimental de mesure des GES (en vert foncé)

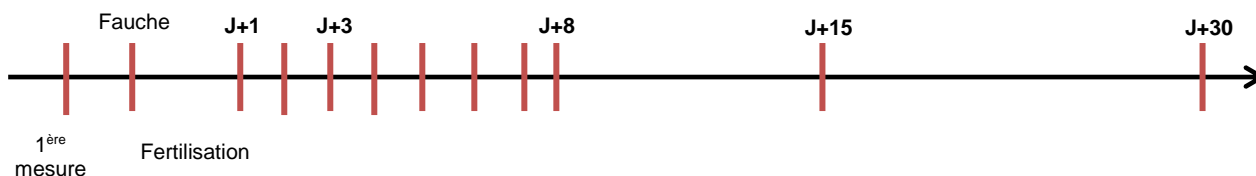


Trois campagnes de mesures ont été effectuées, sur une grande partie de la saison chaude et humide (Tableau 13).

**Tableau 13 : Calendrier des campagnes de mesures de GES**

	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
SICALAIT	24/10 – 24/11/2017	10/12/2017 – 10/01/2018	15/01 – 15/02/2018
SEDAEL	16/10 – 16/11/2017	04/12/2017 – 04/01/2018	21/01 – 21/02/2018

Six prélèvements ont été réalisés pour chacune des 3 campagnes de mesure. Une mesure est réalisée la veille de la fauche, sur couvert haut. Les mesures suivantes interviendront après la fertilisation (J+1, J+3, J+8, J+15 et J+30 après la fertilisation) (Figure 41).



**Figure 41 : Calendrier des prélèvements à chaque campagne de mesure**

En moyenne 6 à 8 fauches sont réalisées chaque année sur la parcelle. La fertilisation a lieu au lendemain de la fauche. Comme les dégagements gazeux sont directement liés à celle-ci, c'est durant cette période que sont réalisés les prélèvements.

Les prélèvements ont lieu à T0min, T30min et T60min pour chacune des chambres. Ainsi, ce sont 48 mesures qui sont réalisées (8 micro-parcelles x 2 chambres x 3 mesures) pour chaque date de prélèvement dans chaque site.

Les chambres doivent donc rester fermées 60 minutes. À T0, la chambre est fermée, et ce jusqu'à la fin des prélèvements. Le ventilateur est activé pendant 1 minute puis il est arrêté. Le prélèvement de gaz est réalisé grâce à une seringue de 20 mL sur laquelle est fixée une aiguille (0.9\*40 mm) à travers le septum du bouchon. Trois va-et-vient du piston sont nécessaires au sein de la chambre puis le prélèvement est injecté dans un tube en verre sous vide de 12 mL. L'opération est répétée 30 minutes plus tard (T30) puis à nouveau 30 minutes après (T60). L'heure à laquelle chaque échantillon est prélevé est notée de façon à pouvoir réaliser les calculs d'émissions de gaz. Au retour du terrain, les tubes sont fermés hermétiquement à la cire et conservés à 4°C. Ils seront envoyés au laboratoire de Montpellier à l'issue de la campagne de mesure pour être analysés par chromatographie en phase gazeuse (CPG).

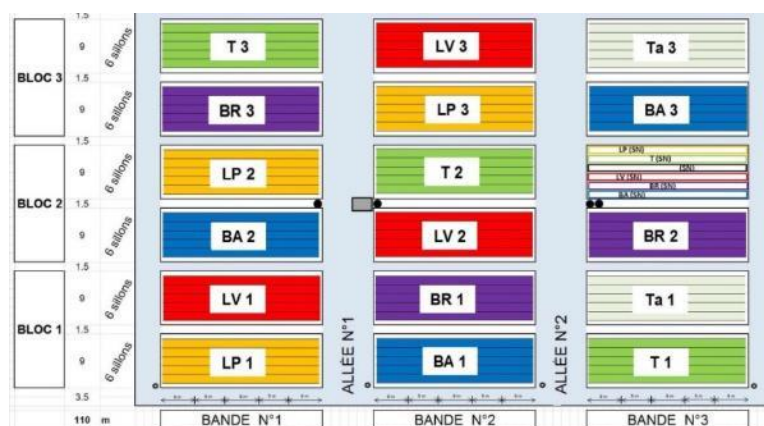
Le laboratoire de Montpellier a rencontré différentes difficultés avec un équipement récemment acquis. Cet équipement permettait de faire face à l'analyse d'un grand nombre d'échantillon grâce à système de lecture automatisée. Cependant, les niveaux de détection du CO<sub>2</sub> permis par l'appareil étaient trop hauts pour évaluer les niveaux d'émissions du CO<sub>2</sub> sur prairie. Par ailleurs, d'autres difficultés ont été rencontrés avec les flacons servant au transport des gaz : bouchons non étanches (ayant généré un nombre important de données manquantes), interaction entre le caoutchouc des bouchons et le CO<sub>2</sub> contenu dans le flacon.

Les analyse de gaz n'ont ainsi pas pu être réalisées. La résolution de ces problèmes techniques est en cours. Une nouvelle étude sera conduite sur la période septembre 2019 – mars 2021.

### Parcelles de canne à sucre

Les émissions de GES ont été mesurées pour les sols du dispositif SOERE PRO Réunion, sur la station expérimentale Cirad à la Mare (région Nord, commune de Ste Marie), sur nitisol et sur andosol (Région Est, commune de St Benoît) sur le dispositif du projet Tero Réunion (eRcane),

Sur le site sur nitisol différents traitements de fertilisation sont appliqués : du lisier de porc (LP), des boues d'épuration séchées apportées tous les ans (BA), et de l'urée en tant que fertilisation témoin (T), appliqués aux doses 174, 118, et 161 kg N ha<sup>-1</sup> (Figure 42).

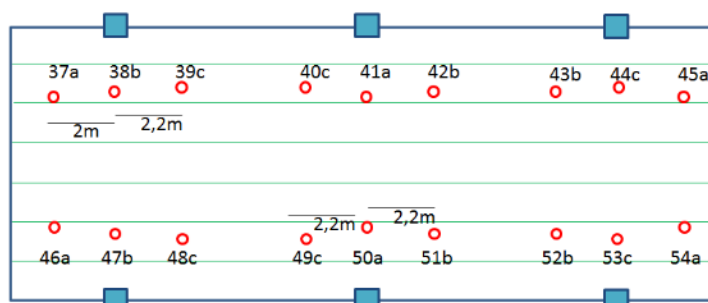


**Figure 42 : Plan partiel du dispositif : les 3 blocs (sur 5) sur lesquels sont mesurées les émissions de GES pour les 3 modalités de fertilisations (sur 6) T, LP et BA**

Les mesures de GES ont été effectuées en système de culture de la canne à sucre (variété R579) en année de première repousse, d'Octobre 2014 à Octobre 2015, depuis le 5<sup>ème</sup> jour précédant la coupe, jusqu'au 200<sup>ème</sup> jour après la coupe. Afin d'intégrer les éventuels flushes de minéralisation liés aux épandages de PRO, les jours de mesures ont été répartis de la sorte : J-5, -1, 0 (= épandage), 1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 49 et 200.

Une 2<sup>ème</sup> campagne de mesure a été réalisée afin de documenter la variabilité spatiale des ces émissions sous culture de canne à sucre. La culture de la canne, en rangs, entraîne en effet une hétérogénéité spatiale du couvert comme des racines qui peut a priori contribuer à l'hétérogénéité des émissions de GES. La présence d'asperseurs peut contribuer à cette hétérogénéité.

Cette 2<sup>ème</sup> campagne a concerné le même dispositif expérimental (SOERE PRO Réunion), avec une répartition différente des enceintes. D'une enceinte par parcelle pour la 1<sup>ère</sup> campagne, nous avons positionné 18 enceintes par parcelle pour la 2<sup>ème</sup> campagne. La répartition au sein d'une parcelle (en prenant en compte la position des asperseurs) a été définie de façon à pouvoir mesurer les émissions à 3 distances (10, 35 et 60 cm) du rang de canne (positions a, b, c Figure 43).



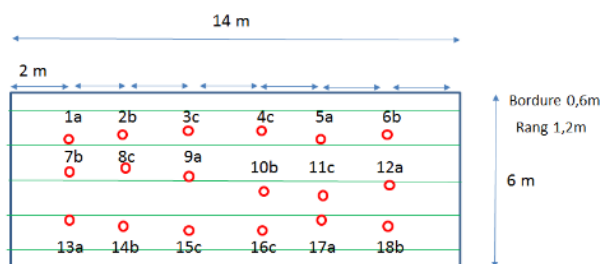
**Figure 43 : Dispositif d'évaluation de l'hétérogénéité spatiale des émissions de GES (à gauche). Rangs de canne en vert, positions des embases et cloches de prélèvement d'échantillons d'atmosphère en rouge**

La période de mesures a englobé la fin de l'hiver austral 2016 et la première partie de l'été austral 2017 (14/11/2016 au 24/02/2017). Les prélèvements d'échantillons d'atmosphère des enceintes ont été effectués lors des épandages de lisier de porc (14/11/2016), boues d'épuration (22/11/2016) et urée (1/12/2016), ainsi que lors de 37 autres dates, couvrant du J0 à J+94 jours (Annexe 3 : Exemple de calendrier de prélèvements (2<sup>ème</sup> campagne, sur nitrosol)).

Les temps de prélèvements ont été calculés de façon à optimiser le temps de présence sur le terrain, avec l'objectif de réduire au minimum la durée entre le 1<sup>er</sup> et le dernier prélèvements afin de réduire le risque de dérive des émissions liées à l'augmentation de température matinale (Annexe 5 : Optimisation des temps de prélèvements

(effectués à 2 personnes, pour une parcelle instrumentée avec 18 enceintes).

Sur le site sur andosol, la répartition des enceintes est la même que celle de la 2<sup>ème</sup> campagne sur nitrosol (18 enceintes par modalité). La répartition au sein d'une parcelle a donc été aussi définie de façon à pouvoir mesurer les émissions à 3 distances (10, 35 et 60 cm) du rang de canne (positions a, b, c Figure 44). La conformation des parcelles (moins longues que sur SOERE PRO) nous a fait privilégier une répartition des enceintes sur 3 interrangs de canne.



**Figure 44 : Dispositif d'évaluation de l'hétérogénéité spatiale des émissions de GES sur andosol (à gauche). Rangs de canne en vert, positions des embases et cloches de prélèvement d'échantillons d'atmosphère en rouge**

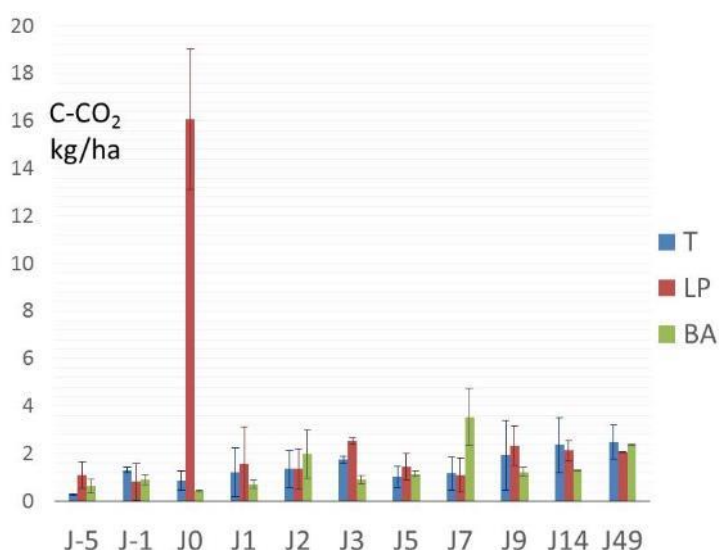
### 3.4.3. Résultats des mesures

Le laboratoire de Montpellier a rencontré différentes difficultés avec le module récemment acquis d'automatisation du passage des échantillons dans le CPG. A sa mise en service, il s'est avéré les niveaux de détection du CO<sub>2</sub> permis par l'appareil étaient trop hauts pour évaluer les niveaux d'émissions du CO<sub>2</sub> sur prairie. Par ailleurs, d'autres difficultés ont été rencontrées avec les flacons servant au transport des gaz : bouchons non étanches (ayant généré un nombre important de données manquantes), interaction entre le caoutchouc des bouchons et le CO<sub>2</sub> contenu dans le flacon.

Les analyse de gaz sur parcelles de prairies n'ont ainsi pas pu être réalisées. La résolution de ces problèmes techniques est en cours. Une nouvelle étude sera conduite sur la période septembre 2019 – mars 2021.

Sur parcelles de canne à sucre les prélèvements réalisés sur le site sur nitisol ont été réalisés avant le changement de matériel d'analyse du laboratoire de Montpellier. Ils ont pu être analysés.

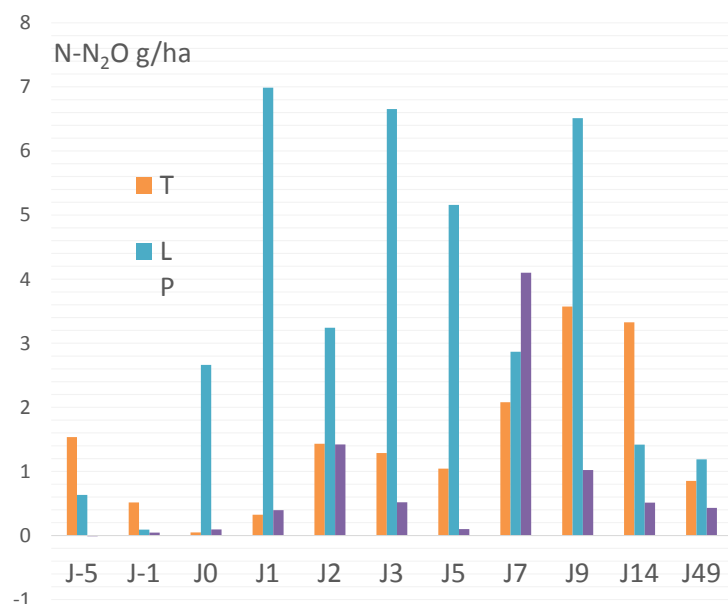
Les résultats permettent d'établir les cinétiques d'émissions de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O.



**Figure 45 : Emissions de CO<sub>2</sub> mesurées avant, à l'épandage et après épandage (moyennes de 3 parcelles par traitement)**

On observe (Figure 45) que l'intensité des émissions de CO<sub>2</sub> est variable (Cf les barres d'erreur qui symbolisent les écart-types). La variabilité importante est observable à la fois pour un même traitement à une même date (3 parcelles par traitement), entre traitements différents à une même date et pour un même traitement à des dates différentes. Cela peut amener à se questionner sur le nombre idéal de répétitions à considérer pour diminuer l'hétérogénéité intégrée avec 3 enceintes par traitement. Avant épandage, seules les émissions mesurées à J-5 sur les parcelles ayant reçu 1 an auparavant du lisier de porc ou des boues de STEP sont supérieures à celles mesurées sur les parcelles témoin ayant reçu de l'urée. Un jour avant épandage, la variabilité des émissions ne permet plus de distinguer un éventuel effet du type de fertilisation apportée un an auparavant. A l'épandage, les émissions de CO<sub>2</sub> mesurées sur les parcelles recevant du lisier de porc sont environ 10 fois plus élevées que celles mesurées sur les parcelles recevant de l'urée ou des boues de STEP. On peut émettre l'hypothèse que la forme physique du lisier (liquide) et la forme chimique du carbone sont favorables à

l'existence d'émissions élevées de CO<sub>2</sub>. Le calcul de l'ISMO (indice de stabilité de la MO) réalisé par ailleurs semble indiquer que le carbone du lisier de porc est peu susceptible d'être transformé en humus (C stable sur le long terme) donc semble potentiellement facilement accessible à la minéralisation par les microorganismes du sol.



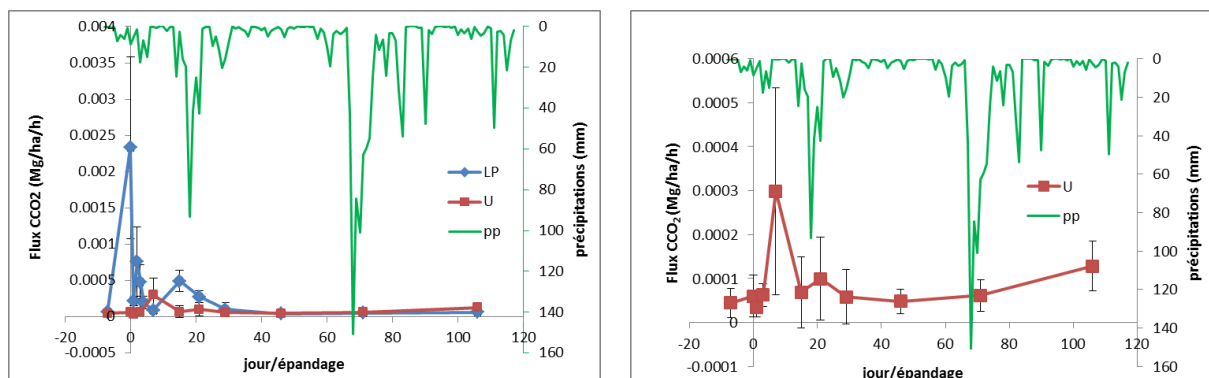
**Figure 46 : Emissions de N<sub>2</sub>O mesurées avant, à l'épandage et après épandage (moyennes de 3 parcelles par traitement)**

Les émissions moyennes de N<sub>2</sub>O pour les parcelles recevant des boues étaient plus faibles (48%) que celles mesurées sur les parcelles recevant de l'urée. Celles mesurées sur les parcelles recevant du lisier de porc étaient plus élevées (133%) que celles mesurées sur les parcelles recevant de l'urée. Les différents fertilisants ont eu des dynamiques d'émissions différentes pendant les 49 jours suivant les épandages. Les émissions les plus fortes pour les parcelles recevant du lisier de porc ont été mesurées principalement durant les 9 jours suivant l'épandage (Figure 46). Pour les parcelles recevant de l'urée, les plus fortes émissions ont été mesurées entre les 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> jours après l'épandage, alors que les pics observés pour les parcelles recevant des boues ont été relevés au 2<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> jours.

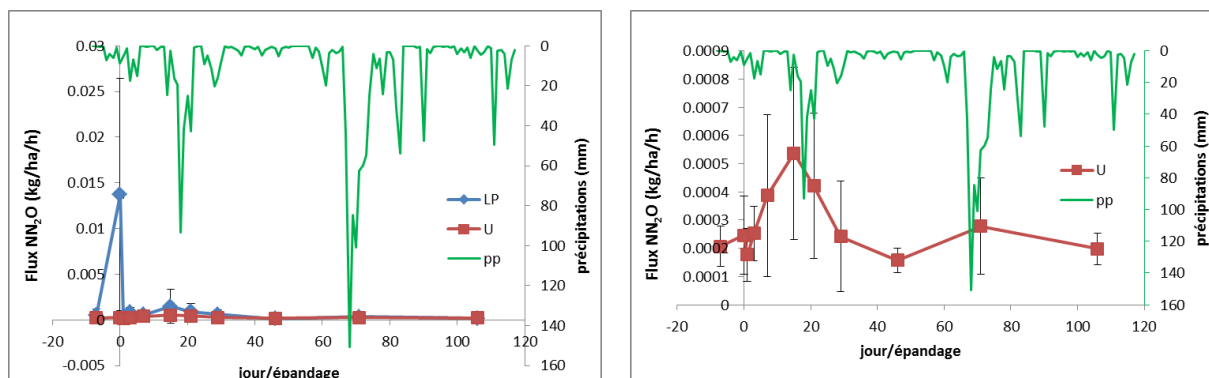
Pour les fertilisants solides (boue et urée), nous pouvons émettre l'hypothèse que les émissions sont dépendantes de l'humidité du sol ; la dénitrification étant favorisée par les conditions anaérobies pouvant advenir par exemple quand la porosité du sol est saturée par l'eau. Le lisier, liquide, peut promouvoir une dénitrification dès l'épandage. L'état physique des fertilisants et la forme de l'azote peut influencer l'accessibilité de l'azote aux microorganismes du sol (Gregorich et al, 2005 ; Meijide et al., 2009) et donc les facteurs d'émissions de N<sub>2</sub>O.

Sur andosol les mesures ont été réalisées entre 2017 et 2018. Malgré les problèmes de mise au point du nouveau CPG, il a été possible, avec la sollicitude des collègues techniciennes et l'aide de la stagiaire dédiée à la tâche 4 sur canne (Myriam Soutif-Bellanger, césure AgroParisTech, 2017-2018) puis d'un autre stagiaire dédié à certains aspects méthodologiques (David Bracquemond, Ecole de chimie Montpellier, 07/2018) de doser CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O de 2666 tubes sur 2784 tubes échantillonnés.

Les flux calculés de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O sont présentés à la Figure 47.







**Figure 47 : Flux de  $\text{CO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}$  (détails haut droite et bas droite) sur Andosol pour 2 modalités (lisier de porc et urée), mesurés à l'aide de 18 enceintes par modalité. Les précipitations figurent en vert.**

## **$\text{CO}_2$**

On peut noter que les émissions les plus fortes sont mesurées dès le jour de l'épandage du lisier de porc, et se maintiennent à un niveau jusqu'à 12 fois plus élevé que les émissions basales (mesurées à J-7) pendant 4 jours avant de redescendre au niveau basal. Ce n'est qu'après d'un épisode pluvieux marqué (J+15 à J+21) que les émissions atteignent des niveaux 8 fois plus élevés que les émissions basales. Au-delà de 29 jours après épandage, malgré d'autres épisodes pluvieux (cyclone Berguita de J+77 à J+85) les émissions de  $\text{CO}_2$  demeurent à un niveau proche de celui des émissions basales.

Les plus fortes émissions après épandage du lisier représentent 9.5 kg de C/ha/jour. Sur 29 jours, les émissions cumulées représentent 118kg/ha, ce qui est bien peu par rapport aux apports du lisier et les tonnes de carbone du sol.

Les émissions fortes à l'épandage ont déjà été observées pour le lisier sur le dispositif du SOERE PRO (Kyulavski, 2016). On peut émettre l'hypothèse que la forte charge en carbonates des lisiers de porc peut conduire à une décarbonatation très rapide à l'épandage (Chantigny et al., 2002). De même, la présence de carbone facilement biodégradable (le lisier de porc a un Indice de Stabilité de la MO, ISMO, bas) peut avoir favorisé une minéralisation rapide de ce carbone par les microorganismes (Rochette et al., 2000), dès les premiers jours pour le carbone soluble, puis entre J+15 et 21 pour le carbone organique facilement décomposable.

Les émissions de  $\text{CO}_2$  les plus fortes pour la modalité Urée n'interviennent que 7 jours après l'épandage (émissions 6 fois plus élevées que les émissions basales), puis reviennent rapidement à des niveaux comparables aux émissions basales. Comme pour le lisier, il ne semble pas y avoir d'influence des pluies sur les émissions de  $\text{CO}_2$  pour la modalité Urée. Ces 2 observations sont en faveur d'une hypothèse du nécessaire passage par la décomposition de la forme organique de l'azote de l'urée par les uréases des microorganismes telluriques. Les processus biologiques étant plus longs que les processus chimiques, il semble donc normal que l'on observe ce décalage temporel des émissions après épandage.

Les plus fortes émissions après épandage de l'urée représentent 2.1 kg de C/ha/jour. Sur 29 jours, les émissions cumulées représentent 16kg/ha, ce qui est bien peu par rapport aux apports du lisier et les tonnes de carbone du sol.

Remarque : le dispositif expérimental ne permet pas de distinguer la respiration autotrophe des racines de canne de la respiration hétérotrophe des microorganismes telluriques (pas d'utilisation du marquage isotopique par exemple). Cependant, on n'observe pas de variation nette des émissions de  $\text{CO}_2$  dans le temps. La croissance de la canne, donc de ses racines, dont on considère qu'elles sont à leur optimum de croissance aux alentours de 2 mois après la coupe, ne semble pas perturber le signal des émissions des microorganismes telluriques.

## **$\text{N}_2\text{O}$**

Les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  suivent globalement les mêmes tendances que les émissions de  $\text{CO}_2$ . Les pics d'émissions pour le lisier se situent dès l'épandage (25 fois supérieures aux émissions basales mesurées à J-7) puis entre J+15 et 21 (2.8 fois supérieures aux émissions basales). Dès 29 jours après épandage, et malgré les dépressions tropicales et cyclone, les émissions restent à des niveaux comparables aux émissions basales.

Les plus fortes émissions après épandage du lisier de porc sur Andosol représentent 37.7 g de N/ha/jour. Sur 29 jours, les émissions représentent 461 g/ha, ce qui représente 3.07‰ par rapport aux 150 kg de N apportés par le lisier.

Les émissions suivant épandage de l'urée étaient plus faibles que celles dues au lisier. Le pic d'émission de  $\text{N}_2\text{O}$  ne représentait qu'un 30ième de celui dû au lisier. Ces résultats sont conformes à la littérature (ex.



Gregorich et al., 2005) qui rapporte des émissions supérieures dues aux fertilisants liquides comparées à celles des fertilisants solides, comme l'urée. La forte concentration en ammonium dans le lisier peut entraîner des émissions élevées de  $N_2O$ . Le lisier, liquide, peut également provoquer temporairement des conditions anoxiques dans le sol et favoriser la dénitrification. Le décalage d'émissions dues à l'urée est observé au même titre que celui des émissions de  $CO_2$  : elles n'interviennent qu'entre J+15 et J+21 après épandage puis reviennent à des niveaux proches des émissions basales. L'intervention des microorganismes semble être à l'origine de ce décalage temporel (minéralisation de l'azote organique). Les pluies cycloniques (J+77-85) semblent favoriser un regain d'émissions de  $N_2O$  de la modalité Urée. Cependant, les écart-types empêchent de conclure à une relation claire entre porosité saturée et émissions, dans ce cas.

Les plus fortes émissions après épandage de l'urée sur Andosol représentent 6.7g de N/ha/jour. Sur 29 jours, les émissions représentent 54g/ha, ce qui représente 0.36‰ par rapport aux 150 kg de N apportés par l'urée.

### 3.4.4. Conclusion et perspectives

Les premiers résultats exposés ici tendent à montrer que les émissions après épandage d'urée sont bien moindres que celles mesurées après épandage de lisier de porc, sur Andosol. D'autre part, ces émissions sur Andosol sont inférieures à celles mesurées sur Nitisol. Ces premiers résultats mériteraient d'être confirmés et étendus à d'autres types de sol représentatifs des surfaces agricoles de la Réunion, notamment ceux qui sont classés en « sols bruns ».

L'étude de la variabilité des émissions sur parcelles en canne à sucre a été entamée par Myriam Soutif-Bellenger (2018) sur une partie des dispositifs expérimentaux (Figure 48). Il faudrait l'étendre à l'ensemble des dispositifs disponibles, y compris les dispositifs avec chambres automatiques, pour pouvoir comparer et déterminer le nombre nécessaire et suffisant d'enceintes mobiles à suivre par parcelle.



**Figure 48 : Différents types de dispositifs utilisés depuis 2015 pour mesurer les émissions de  $CO_2$  et  $N_2O$  (ici sur Nitisol) : enceintes individuelles (à gauche 1 par parcelle ; au centre 6 par parcelle ; à droite 18 par parcelle) et chambres de mesures automatiques (à droite et à gauche, 3 par parcelles)**

Les facteurs d'émissions ont été rapidement estimés pour les parcelles sur Andosol amendées avec lisier de porc et urée. Il faudrait faire l'exercice sur l'ensemble des dispositifs canne à sucre et affiner.

A défaut de pouvoir calculer des facteurs d'émission de niveau Tier 2 à partir de ces expérimentations, nous avons utilisé dans la suite de cette étude, et en particulier dans le paramétrage du calculateur Ex-ACT, les valeurs Tier 2 fournies par le Référentiel pour l'Analyse Énergétique et l'Analyse du Pouvoir de Réchauffement Global des exploitations d'élevage à La Réunion (Thévenot et al., 2011). Les valeurs ont été calculées par la méthode d'analyse énergétique développée par le groupe Planète (Risoud et Theobald, 2002).

## 3.5. Changements d'usages & bilans GES

A La Réunion, les principaux changements attendus ces prochaines décennies dans le secteur agricole sont les changements d'usage des terres, en particulier la conversion de surfaces actuellement en canne à sucre vers des surfaces cultivées en ananas, maraichage, ou en verger. Ces changements d'usage des terres peuvent potentiellement causer des pertes ou des gains de carbone (C) dans les sols et la biomasse. Un des objectifs du projet C@run est de fournir des bilans GES suite à des scénarios de changements d'usage des sols agricoles de La Réunion.

La démarche globale de cette étude consiste à établir des bilans C de ces changements d'usages attendus, grâce à la valorisation de la base de données d'analyses de sol, la cartographie des sols fondée sur leurs signatures spectrales et l'utilisation du calculateur EX-ACT.

### 3.5.1. Méthode

EX-ACT (pour *Ex Ante* Carbon-balance Tool) est un outil développé par la FAO, permettant l'estimation du bilan C de projets agricoles et/ou forestiers. Cet outil se présente sous la forme d'un classeur Excel, incluant différents onglets (les « modules ») correspondant à différents postes d'émissions ou de puits de gaz à effet de serre (GES) lors de la mise en place d'un projet : changements d'usage des terres, changement de modes de gestion au sein des cultures annuelles, gestion des prairies, dégradation des terres, gestion des zones humides côtières, consommation d'intrants et d'énergie, pêcheries et aquaculture. Le bilan GES des différents modules est établi à l'aide de facteurs d'émissions et de valeurs par défaut présents dans les rapports du GIEC, et contenus dans les formules de calcul. Le résultat final est le bilan net du projet, les émissions ou puits de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, et C sont exprimés en tCO<sub>2</sub>-eq. Pour obtenir un bilan C d'un projet, l'utilisateur doit renseigner (i) des informations générales sur le projet (aire géographique, caractéristiques du sol et du climat, durée du projet), (ii) dans chaque module concerné par le projet, des projections de changements d'utilisation des terres ou de technologies ; et (iii) éventuellement des facteurs d'émission spécifiques à la région d'étude si ces valeurs sont disponibles.

Dans le cas de La Réunion, les changements d'usage attendus impliquent l'utilisation de deux modules au sein de l'outil EX-ACT afin d'obtenir le bilan carbone lié à ces changements d'usage : le module changement d'usage des terres, et le module consommation d'intrants, les changements d'usage des terres pouvant entraîner des différences de consommation d'intrants, se traduisant par des changements potentiels d'émissions de GES.

Au sein d'un classeur EX-ACT, l'utilisateur fait l'hypothèse que les surfaces concernées par le scénario mis en place présentent un même type de sol et un même climat, car les facteurs d'émission du GIEC diffèrent selon le type de sol et le climat. Étant donné la très grande variabilité climatique et pédologique à La Réunion, il ne semble pas envisageable de n'utiliser qu'un seul classeur EX-ACT pour l'ensemble de La Réunion. Nous avons donc déterminé des unités pédoclimatiques homogènes (la façon dont ces unités ont été obtenues est expliquée en détail à la section « Stratification du territoire »), et utilisé un classeur EX-ACT pour chacune de ces unités (voir méthode en annexe 7). Toutefois une comparaison entre l'approche spatiale proposée ici sera confrontée à un calcul de bilan n'utilisant qu'un seul classeur (approche dite 'globale').

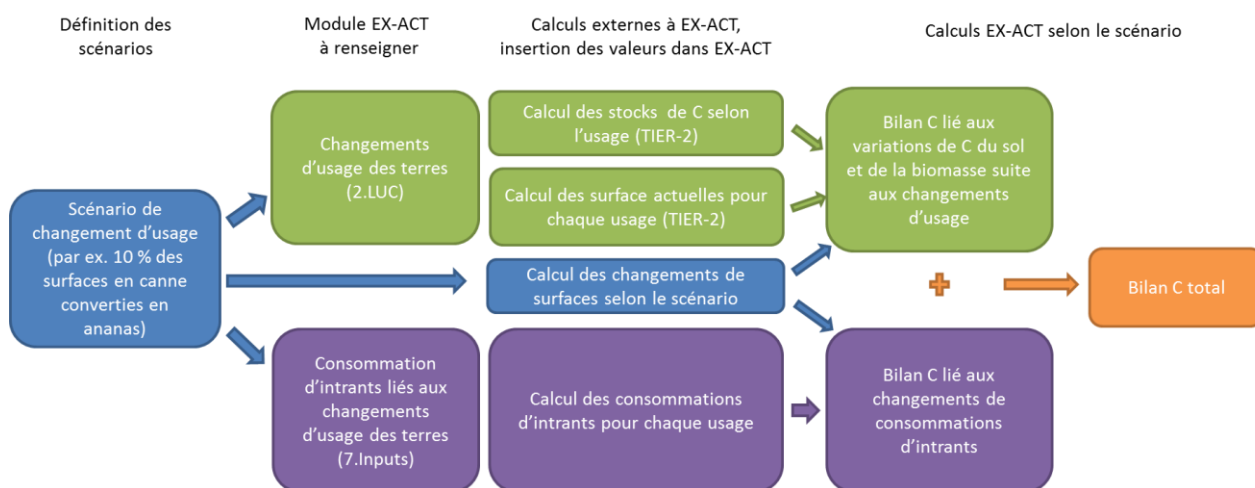
Par défaut, l'utilisateur d'EX-ACT n'a besoin de remplir que les surfaces concernées par les changements d'usage prévus ; le calculateur applique un coefficient de changement de stock de carbone (C) du sol et de biomasse (un facteur d'impact) à ces changements de surface, permettant d'obtenir un bilan carbone du changement d'usage. Les facteurs d'impacts utilisés par défaut, appelés TIER-1, proviennent de rapports du GIEC (Bernoux et al., 2016), et diffèrent selon le type de changement d'usage (par exemple forêt vers prairie, cultures annuelles vers forêts plantées, etc.), et le climat. Utiliser les facteurs TIER-1 comporte cependant plusieurs inconvénients dans notre cas, comme (i) les types de changements d'usages renseignés par défaut dans EX-ACT n'intègrent pas les changements attendus à La Réunion, comme les transitions canne vers ananas ou maraîchage, et (ii) les facteurs d'émission TIER-1 ont une incertitude très élevée, notamment en milieu tropical.

Nous avons ainsi cherché à produire des facteurs d'émission des changements d'usage des sols spécifiques à La Réunion. Ces facteurs d'émission, dits de type TIER-2 (facteurs d'impacts régionaux) ont été déterminés au sein de chaque unité pédoclimatique homogène, grâce notamment à la valorisation de la base d'analyses de sols, qui contient de nombreuses analyses de terre d'échantillons de sols cultivés de La Réunion.

Pour résumer, les données nécessaires à l'utilisation d'EX-ACT au sein d'une unité pédoclimatique homogène dans le cadre de notre étude sont :

- a. les stocks de C (sol et biomasse) selon l'usage des sols,
- b. les surfaces actuelles de chaque usage,
- c. les surfaces de chaque usage suite à l'application du scénario de changement d'usage,
- d. les consommations d'intrants pour chaque usage.

La Figure 49 résume la démarche globale utilisée dans cette étude.



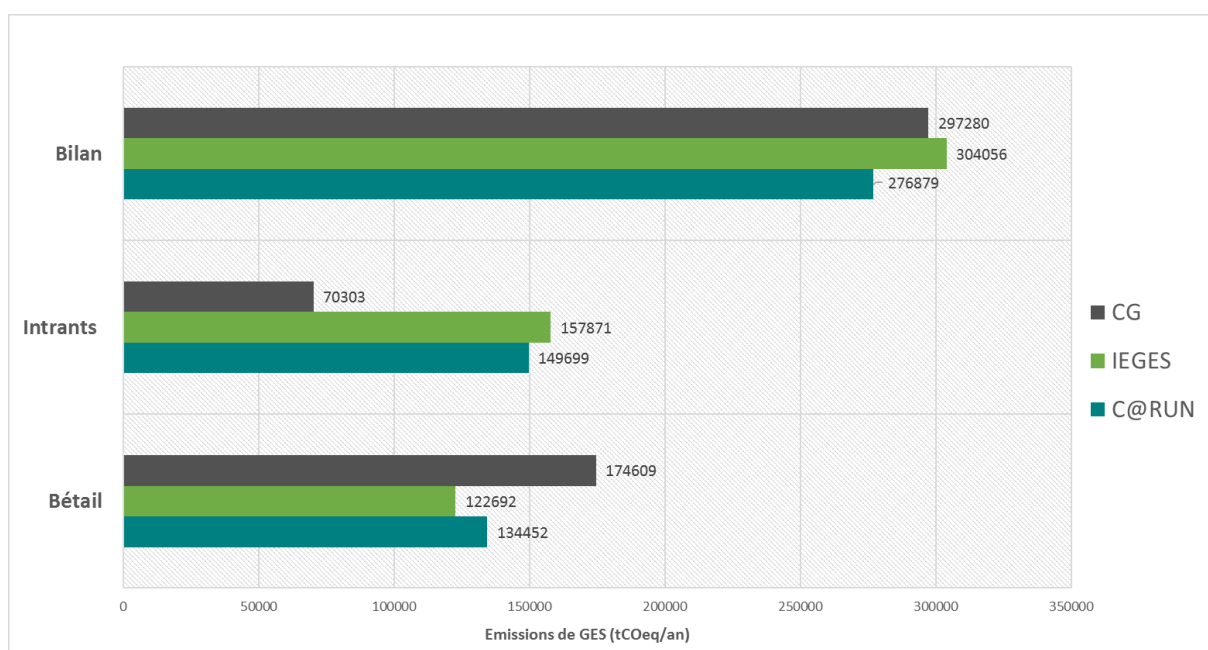
**Figure 49 : Démarche globale de l'utilisation du calculateur EX-ACT au sein d'une unité pédoclimatique homogène pour l'évaluation du bilan C lié aux changements d'usage des terres à la Réunion**

Les unités pédoclimatiques retenus pour l'évaluation des bilans GES sont celles décrites dans le paragraphe 3.3.3. Ce sont celles qui montrent des différences significatives des stocks de carbone du sol selon différents modes d'usage. Seuls 13 pédoclimats (sur les 36 définis) ont été considérés pour le bilan carbone Ex-ACT et les surfaces considérées représentent 70% de la surface agricole totale utilisée pour cartographier les stocks de carbone (49249 ha). Ces valeurs de stocks seront ainsi utilisées dans le calculateur afin d'apprécier le devenir du CO<sub>2</sub> selon les modes d'usage.

### 3.5.2. Simulations

#### 3.5.2.1. Situation actuelle

Deux études (Grondin, 2012; Louis, 2013) dénommées respectivement « IEGES » et « CG » dans la suite proposent un inventaire des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le territoire réunionnais pour chaque secteur d'activité. Le poste agricole représente une très faible part des émissions de GES avec respectivement 4 et 7% des émissions totales de GES.



**Figure 50 : Emissions annuelles de GES du secteur agricole de La Réunion selon différentes sources et méthodes comparées à l'évaluation produite par le Projet C@RUN**

Les émissions de GES du secteur agricole estimées à partir de l'outil Ex-Act (FAO), calculées à partir de l'ensemble du cheptel animal et sur toute la surface agricole de l'île sont présentées sur la Figure 50 et comparées aux résultats des deux études IEGES et CG.

Les émissions liées au bétail (fermentation entérique et déjections animales) du bilan C@RUN (134 452 tCO<sub>2</sub>eq) sont comprises entre les estimations des deux autres inventaires (IEGES, CG). Les estimations des autres postes (nommés « Intrants ») sont plus variables en raison de l'hétérogénéité des méthodologies employées dans les trois études (IEGES : sols agricoles et CG : canne ; culture-engrais).

En termes de bilan global, les deux inventaires présentent des émissions de GES autour de 300 000 tCO<sub>2</sub>eq pour le secteur agricole tandis que le bilan C@RUN est légèrement plus faible (276 879 tCO<sub>2</sub>eq).

### 3.5.2.2. Scénarios de changements d'usage des terres

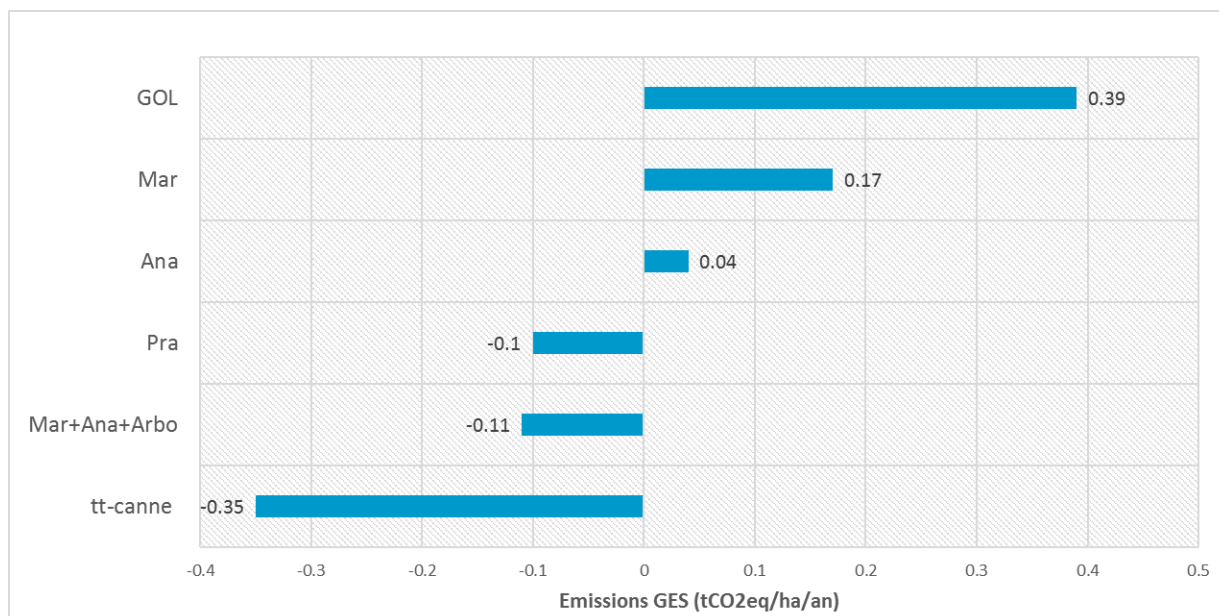
Nous avons défini 6 scénarios de changement d'usage des terres plausibles (ex : augmentation des surfaces maraîchères) ou extrêmes (disparition d'une des deux sucreries de canne) afin d'illustrer le fonctionnement du calculateur et fournir des références d'impacts de changements d'usages sur les stocks de carbone auprès des décideurs potentiels.

1. Le scénario 'Mar' modélise une augmentation des surfaces cultivées en maraîchage afin d'atteindre l'autosuffisance en produits maraîchers dans les 20 années à venir, soit à l'horizon 2040 ; l'augmentation des surfaces cultivées en maraîchage se faisant au détriment de celles cultivées en canne à sucre. En supposant que les fruits et légumes locaux approvisionnent 70% du marché du frais, un changement de 7.3% des surfaces cannières en surfaces maraîchères devrait permettre d'atteindre l'objectif d'approvisionnement de 100% du marché du frais.
2. Le scénario 'Mar+Ana+Arbo', basé sur la même hypothèse, modélise un changement de 25% des surfaces cannières en surfaces de maraîchage, ananas et arboriculture, réparties de manière équivalente.
3. Le scénario 'Ana' simule un doublement des surfaces en ananas au détriment des surfaces cultivées en canne à sucre. En effet, la diversification de la canne à sucre vers la culture de l'ananas est un changement d'usage observé depuis plusieurs années à La Réunion.
4. Le scénario 'Pra' simule une augmentation de 15% des surfaces en prairies liées à la production de fourrage dans les Bas au détriment des surfaces cultivées en canne à sucre. Ce scénario se base sur l'objectif d'augmentation des effectifs animaux des filières pour lequel, en l'absence d'amélioration des rendements, les besoins en fourrages devront être comblés grâce à une augmentation des surfaces de prairies de fauche (Leleux, 2016).
5. Le scénario 'GOL' simule la fermeture de l'usine du Gol dans le Sud de l'île. Les surfaces précédemment en canne sont transformées en 40% de prairie, 40% de maraîchage, 10% d'ananas et 10% d'arboriculture.
6. Enfin, le dernier scénario 'tt-canne' modélise un système cannier en monoculture à La Réunion ; toutes les surfaces sont donc transformées en canne à sucre.

### 3.5.2.3. Résultats d'émissions de GES

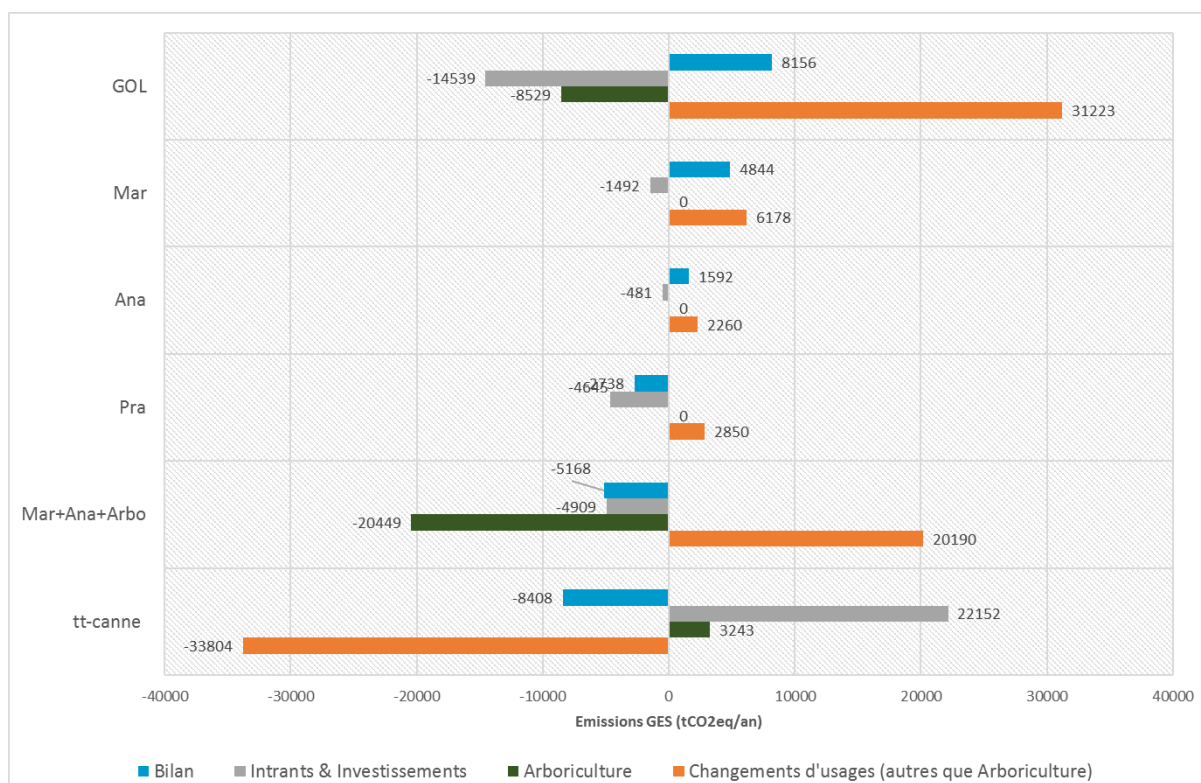
Les émissions de GES par hectare et par an (Figure 51) pour chaque scénario montrent de manière synthétique les scénarios « sources » ('Mar', 'Ana', 'GOL') et les scénarios « puits » ('Mar+Ana+Arbo', 'Pra', 'tt-canne') de carbone.





**Figure 51 : Bilans des émissions de GES par hectare et par an des différents scénarios de changements d'usages**

Le bilan des émissions de GES pour l'ensemble des 13 pédoclimats considérés dans Ex-Act, est détaillé par composante (les changements d'usages qui affectent le carbone de la biomasse et du sol, l'arboriculture qui est un puits de carbone par sa composante de biomasse ligneuse et les intrants qui déterminent les émissions de N<sub>2</sub>O) pour chaque scénario de changement d'usage dans la Figure 52.



**Figure 52 : Bilans des émissions de GES par scénario et par composante pour l'ensemble des 13 pédoclimats**

La composante « changements d'usages » joue d'ailleurs un rôle important dans le bilan des émissions de GES pour l'ensemble des scénarios proposés.

Les bilans « sources » de carbone des scénarios 'Mar' et 'Ana' résultent d'émissions de carbone liées à l'augmentation des surfaces en maraîchage et ananas sans être compensés par la baisse des émissions des « Intrants & Investissements ».



L'augmentation des surfaces d'arboriculture (dans les scénarios 'Mar+Ana+Arbo' et 'GOL') fait de la composante « Arboriculture » un puits de carbone compensant parfois les émissions liées aux changements d'usages associés ('Mar+Ana+Arbo').

Le scénario 'Pra' visant à augmenter les surfaces en prairie dans les Bas présente un bilan « puits » de carbone. La baisse des émissions de GES liées aux Intrants & Investissements est plus importante que l'augmentation des émissions de carbone liées à la composante « changements d'usage ».

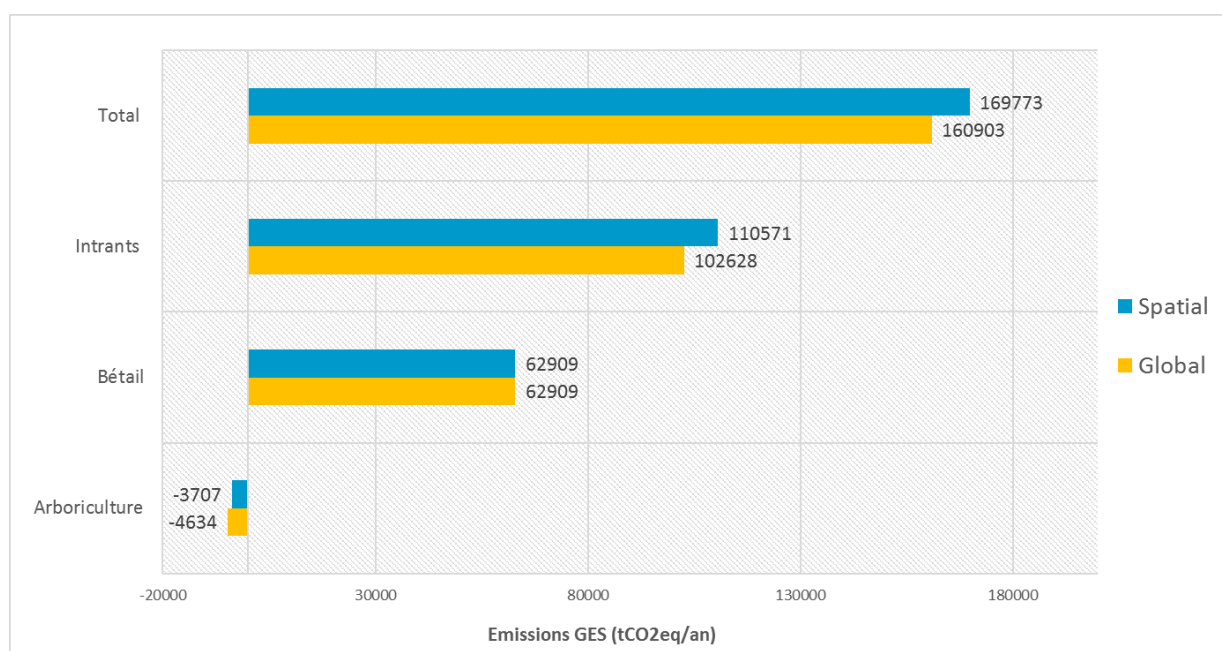
La modélisation de la fermeture du GOL, dans le Sud de l'île, présente un bilan « source » de carbone en raison d'un changement d'usage vers le maraîchage (40%) et ananas (10%) dont les émissions de GES ne sont pas compensées par l'augmentation simultanée des surfaces en prairie (40%) et arboriculture (10%).

A contrario, un changement d'usage général vers la canne à sucre (scénario 'tt-canne') entraîne une diminution des émissions de GES (-8 408 tCO<sub>2</sub>eq), notamment en raison de la forte production de biomasse et de stocks de carbone plus élevés dans les sols sous canne à sucre par rapport aux stocks de carbone du sol des autres modes d'usages, selon la méthode utilisée pour déterminer les variations de stocks entre modes d'usages.

### Comparaison approche spatiale vs approche globale

Bien que les pédoclimats influent sur le bilan total de chacun des scénarios, une approche 'globale' de l'ensemble des pédoclimats défini en une seule entité donnerait-elle un résultat équivalent ?

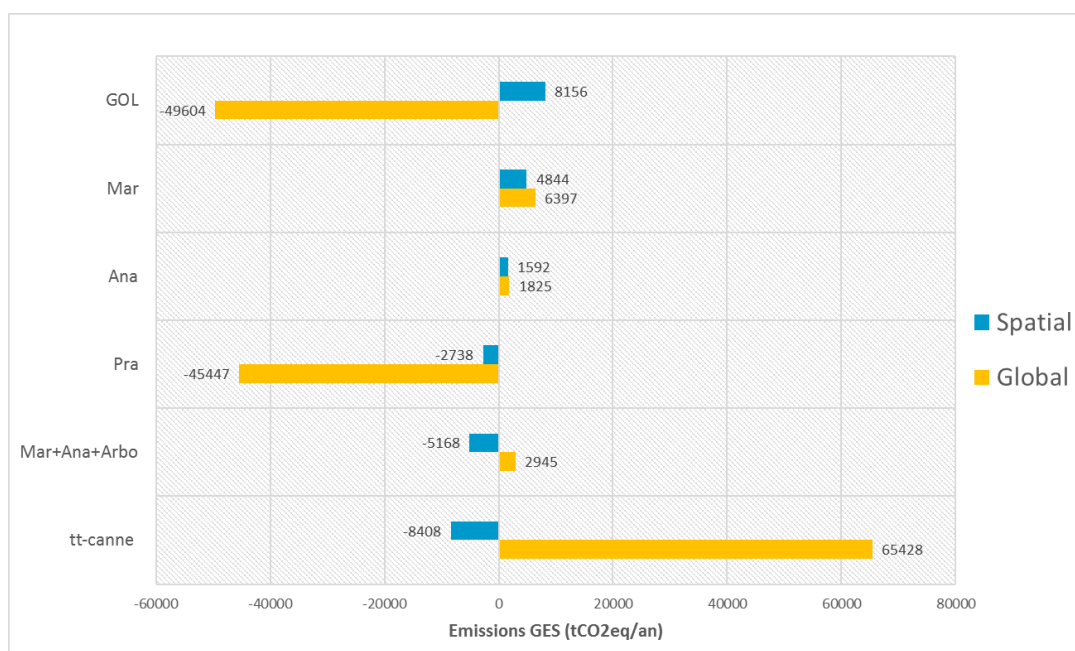
Le bilan annuel des émissions de GES, dans la configuration actuelle des usages des terres, pour la somme des pédoclimats (Spatial) et l'ensemble des pédoclimats considérés en une seule entité (Global), présente des résultats similaires (Figure 53).



**Figure 53 : Bilan annuel total des émissions de GES et détaillé par composante pour les 13 pédoclimats selon les méthodes « Spatial » et « Global » dans la configuration actuelle des usages des terres**

Pour une période de 20 années après les changements d'usage, les émissions de GES entre les scénarios résultant de la somme des pédoclimats (Spatial) et l'ensemble des pédoclimats considérés en une seule entité (Global) varient parfois de manière très importante (Figure 54 et Figure 55). En effet, si les scénarios 'Mar' et 'Ana' ont des bilans de carbone équivalents avec les deux méthodes, les autres scénarios présentent des bilans très différents, et contradictoires, en termes d'émissions de GES.

Deux raisons à cela : le sol et le climat.

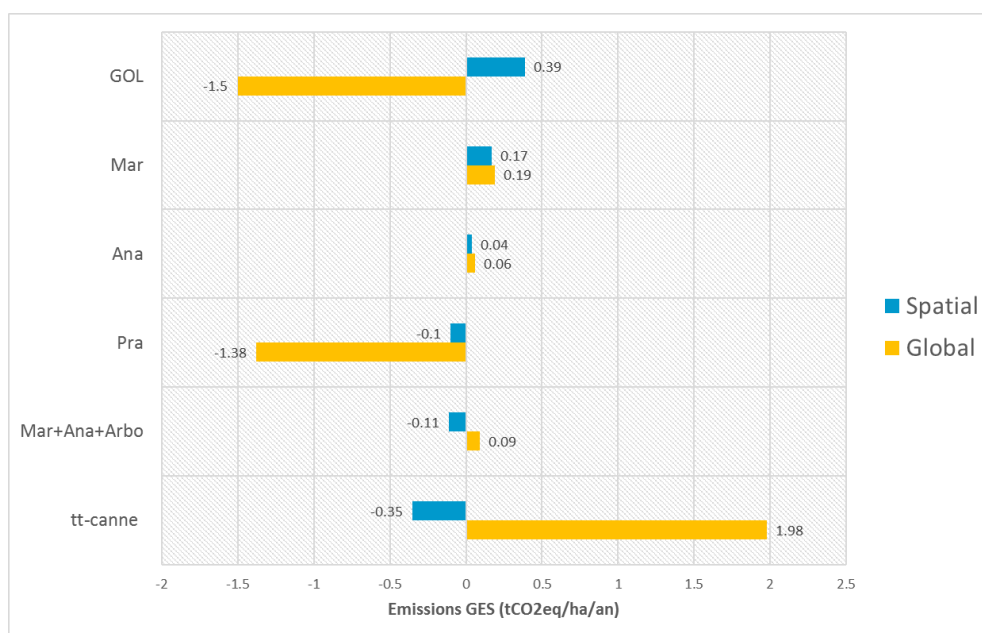


**Figure 54 : Bilans annuel total des émissions de GES par scénario selon les méthodes «Spatiale» et «Globale»**

Le scénario 'Pra' présente ainsi des bilans « puits » de carbone mais des émissions de GES près de 17 fois moins importantes avec la méthode « Globale ». Cela s'explique par la différence des valeurs des différences de stocks utilisées par la méthode « Spatiale » et la méthode « Globale ». En effet, l'approche par pédoclimat (Spatiale) n'a pas démontré une différence significative entre les stocks de carbone sous canne à sucre et prairie pour la plupart des pédoclimats en raison d'un faible nombre d'analyses de sols sous prairie alors que pour l'ensemble des pédoclimats (Global), la différence entre les stocks de carbone sous canne à sucre et prairie est importante (130 vs.230).

Les différences entre les deux bilans contradictoires : « puits » et « source » de carbone entre les deux méthodes pour les scénarios 'GOL' et 'tt-canne' s'expliquent de la même manière. Dans le scénario 'GOL', le gain important de surfaces de prairie se traduit par un stockage plus important de carbone dans le sol et donc un bilan « puits » de carbone tandis que dans le scénario 'tt-canne', la perte de surfaces en prairie se traduit par un bilan « source » de GES.

Le scénario 'Mar+Ana+Arbo' présente, quant à lui, deux bilans contradictoires : « puits » de carbone en considérant les pédoclimats et « source » de carbone en ne considérant qu'une seule entité globale. L'origine de cette différence n'est pas le sol mais le climat. Le scénario 'Mar+Ana+Arbo' présente une influence prépondérante pour deux pédo-climats (A2\_TW et AG\_TW) qui font de ce changement d'usage un « puits » de carbone (données non présentées). Le facteur climatique « Tropical Wet » influe fortement sur la fonction « puits » de la composante « Arboriculture ». En effet, les biomasses aériennes totales produites par l'arboriculture sont de 50 tC ha<sup>-1</sup> pour le climat « Tropical Wet » contre 21 tC ha<sup>-1</sup> pour le climat « Tropical Moist » (Bernoux et al.). Le climat de la méthode « Global » étant « Tropical Moist », contrainte imposée par le calculateur comme climat « moyen » de l'île, le facteur climatique engendre effectivement une diminution de la production de biomasse et donc une fonction « puits » de la composante « Arboriculture » moins efficace. A titre d'illustration, le bilan de la composante « Arboriculture » de la méthode « Global » avec un climat « Tropical Wet » est de -47 701 tCO<sub>2</sub>eq/an contre -13 082 tCO<sub>2</sub>eq/an avec un climat « Tropical Moist ».



**Figure 55 : Bilans annuels par ha des émissions de GES par scénario selon les méthodes «Spatiale» et «Globale»**

### 3.5.3. Conclusion

L'outil Ex-Act a été utilisé lors de ce projet ; à condition de renseigner les facteurs d'émissions au niveau de précision Tier 2, cet outil semble adapté à l'évaluation des bilans GES pour un petit territoire comme La Réunion où la diversité des sols, des climats, des usages est importante.

Le bilan C@RUN des émissions de GES, réalisé avec l'outil Ex-Act, présente des résultats équivalents aux autres bilans GES du secteur agricole réalisés à La Réunion (Grondin, 2012; Louis, 2013) avec un total annuel d'émissions de GES de 276 879 tCO<sub>2</sub>eq.

L'outil Ex-Act, plus performant pour évaluer les émissions de carbone dues aux sols et à la biomasse, permet une meilleure évaluation des émissions de GES liés aux changements d'usages des sols (Colomb et al., 2013). De plus, simple d'utilisation et gratuit, il permet de représenter la diversité pédologique, climatique et agronomique du territoire de La Réunion.

En effet, bien que la typologie de sol et de climat du territoire étudié nécessite un ajustement aux catégories de l'outil Ex-Act, son format permet de découper le territoire selon les besoins de l'étude et permet ainsi de représenter des territoires avec une variabilité importante tant d'un point de vue pédologique que climatique, à condition de renseigner les facteurs d'émissions au niveau de précision Tier2.

L'intérêt de la spatialisation et du découpage du territoire selon ses propres caractéristiques pédoclimatiques se trouve confirmé par la comparaison d'une approche spatiale et d'une approche globale où un seul et unique type de pédoclimat représente un territoire aussi diversifié en termes de sols et de climats que l'île de La Réunion. Les résultats contradictoires pour certains scénarios s'expliquent, effectivement, soit par une non-représentation de la diversité climatique se traduisant par exemple, par une surévaluation de la biomasse et aboutissant à un bilan « source » de GES, contradictoire avec le bilan « puits » issu de la méthode de spatialisation ; soit par une non-représentation de la diversité pédologique et des variations de stocks de carbone entre modes d'usages se traduisant par une surévaluation de certains stocks de carbone et aboutissant également à des bilans contradictoires entre la méthode de spatialisation et la méthode globale, simplificatrice.

L'outil Ex-Act permet également de décrypter aisément les sources des émissions de GES en détaillant les compartiments (les changements d'usages qui affectent le carbone de la biomasse et du sol, l'arboriculture qui est un puits de carbone par sa composante de biomasse ligneuse et les intrants qui déterminent les émissions de N<sub>2</sub>O) dont résulte le bilan d'émission de GES des différents scénarios de changements d'usages.

En utilisant l'approche spatiale, trois des scénarios proposés sont « sources de carbone » ('Mar', 'Ana', 'GOL') en raison, majoritairement, d'une augmentation des surfaces de maraîchage, ananas au détriment de la canne à sucre. Quant aux scénarios « puits de carbone », trois facteurs peuvent expliquer ces résultats : la diminution des intrants dans le scénario 'Pra' (augmentation des surfaces en prairies), l'augmentation des surfaces d'arboriculture qui font de ce compartiment un « puits » de carbone compensant les autres émissions ('Mar+Ana+Arbo'), et enfin, la canne étant considérée, dans la méthode utilisée, comme la référence des stocks de carbone du sol et comme productrice importante de biomasse, le scénario d'une monoculture en canne à sucre ('tt-canne') présente un bilan « puits » de carbone.

Les objectifs de l'outil Ex-Act sont de déterminer le type d'impact, positif, négatif ou neutre d'un projet en termes de GES et de déterminer les postes responsables des principales émissions sur le territoire (Colomb et al., 2013). Les émissions de GES estimées avec Ex-Act restent à prendre avec précaution car certaines sources

d'émissions ne sont pas prises en compte, en particulier celles liées à l'alimentation animale importée, aux machines agricoles, aux émissions amonts des carburants, ni des émissions liées à l'apport d'azote dans les résidus de culture (Colomb et al., 2013).

## 4. Perspectives

Même si la convention institutionnelle avec l'Ademe se clôt avec ce rapport, les activités du projet labellisé 'C@run' vont se poursuivre dans les mois à venir avec :

- Le partage des méthodologies et résultats avec la communauté des utilisateurs (structures d'encadrement des filières agricoles, établissements d'enseignements agricoles, structures étatiques intéressées par le sujet comme la DEAL, collègues universitaires et chercheurs),
- La co-construction de scénarios de changements d'usage avec certains utilisateurs.

Les méthodologies développées durant le projet seront également valorisées, à l'échelle internationale pour la Région Ouest de l'Océan indien, par la proposition d'un projet intitulé 'Evaluation du potentiel de séquestration du carbone dans les sols des Iles de l'Océan Indien' ; un financement est demandé dans le cadre des Programmes Opérationnels Européens (FEDER, Interreg V) concernant la valorisation de la recherche réunionnaise dans la zone COI (pays dépendant de la Commission de l'Océan Indien). Cette proposition a pour objectif de développer les connaissances et outils pour une politique territoriale d'atténuation des émissions de GES par la séquestration du carbone dans le sol et la biomasse chez nos partenaires de la zone COI. Les territoires concernés sont des communes rurales de la Région Itasy à Madagascar et l'île de Rodrigues (Maurice). Certaines communautés de communes de La Réunion seront également des territoires-cibles de cette proposition.

D'un point de vue scientifique, il a été démontré ici que les sols au potentiel de stockage de carbone les plus élevés sont également ceux dont le stock de carbone de sol est le plus sensible aux changements d'usage ; il s'agit des andosols dont les constituants majeurs, les allophanes, ont des propriétés qui les rendent fragiles lors de la mise en culture (collapse des gels alumino-silicatés), plus sensibles à l'érosion et perdant leur capacité de protection de la matière organique des sols. Il est clair que c'est une piste de recherche importante concernant les processus qui contrôlent le stockage du carbone dans ces sols que nous chercherons à poursuivre. Enfin, la spectroscopie infrarouge a montré son fort potentiel en termes de classification de sols ; les premiers résultats de ce projet nous a permis de poursuivre dans ce domaine par l'obtention d'une bourse Cifre sur le sujet ; nous développerons encore cette approche (en intégrant des données climatiques) afin de proposer une nouvelle typologie des sols des régions volcaniques adaptée aux besoins du développement durable (fertilité des sols et potentiel d'atténuation).





## Bibliographie

- Arrouays, D., Feller, C., Jolivet, C., Saby, N., Andreux, F., Bernoux, M., 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Étude et Gestion des Sols* 10.
- Basile-Doelsch, I., Brun, T., Borschneck, D., Masion, A., Marol, C., Balesdent, J., 2009. Effect of landuse on organic matter stabilized in organomineral complexes: A study combining density fractionation, mineralogy and  $\delta^{13}\text{C}$ . *Geoderma* 151(3-4), 77-86.
- Bernoux, M., Schiettecatte, L.-S., Tinlot, M., Bockel, L., Branca, G., Gentien, A. and Colomb, V., 2016. EX-Ante Carbon-Balance Tool (EX-ACT) Technical Guidelines for Version 7. <http://www.fao.org/tc/exact/accueil-ex-act/fr/> (accédé le 05-03-2019)
- Bernoux M., Carvalho M.C.S, Volkoff B., Cerri C.C. 2002. Brazil's soil carbon stocks, *Soil Science Society of America Journal*, 66, 3, 888-896.
- Bernoux M., Cerri C.C., Cerri C.E.P. Siqueira Neto M., Metay A., Perrin A.S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M.C., Pavei M., Milne E. 2006. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review, *Agronomy for Sustainable Development*. 26, 1, 1-8.
- Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés.
- Cerri C.E.P., Paustian K., Bernoux M., Cerri C.C., Mellilo J.M. 2004. Combining soil C and N spatial variability and modelling approaches for measuring and monitoring soil carbon sequestration, *Environmental Management*. 33 (S1), 274-288.
- Chantigny, M.H., D.A. Angers, and P. Rochette. 2002. Fate of carbon and nitrogen from animal manure and crop residues in cold and wet soils. *Soil Biol. Biochem.* 34 : 509–517.
- Colomb V., 2013. Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. *Environmental Research Letters*, 8(1) 015029. <https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2F8%2F1%2F015029>
- Elith, J., Leathwick, J. R. and Hastie, T., 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77: 802–813. doi:10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x
- Friedman, J. H., T. Hastie, and R. Tibshirani, 2000. Additive logistic regression: a statistical view of boosting. *Annals of Statistics* 28 2 337–374.
- Gregorich, E.G., Rochette, P., VandenBygaart, A.J., and Angers, D.A., 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research* 83, 53-72.
- Grinand C., Barthès B.G., Brunet D., Kouakoua E., Arrouays D., Jolivet C., Caria G., Bernoux M. 2012. Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid infrared reflectance spectroscopy (MIRS), *European Journal of Soil Science*, 63, 141–151.
- Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., Le Martret H.. 2009. Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar, *Étude et Gestion des Sols*, 16, 1, 23-33.
- Grondin, S., 2012. Inventaire régional des émissions de gaz à effet de serre pour l'île de La Réunion en 2010. Résultats et tendances. 72.
- Hergoualc'h K. 2008. Emissions de gaz à effet de serre par le sol et stockage de carbone en caféiculture conduite sur des andosols en climat tropical Montpellier : Montpellier SupAgro, 229 p. Thèse de doctorat : Sciences du sol : Montpellier SupAgro Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques.
- Hutchinson, G. L., and A. R. Mosier. 1981. Improved Soil Cover Method for Field Measurement of Nitrous-Oxide Fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2): 311-16.



- Leleux, M., 2016. Etude prospective sur la ressource fourragère. BRL ingénierie.
- Louis, C., 2013. Rapport d'étude "Bilan Carbone" Territoire du Conseil Général de La Réunion". Conseil Général de La Réunion.
- Meersmans J., Martin M.P., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Saby N.P.A., Bispo A. Arrouays D. 2012. A high-resolution map of French soil organic carbon, *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 841-851.
- Meijide, A., García-Torres, L., Arce, A., and Vallejo, A. (2009). Nitrogen oxide emissions affected by organic fertilization in a non-irrigated Mediterranean barley field. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132, 106-115.
- Mizota, C., Reeuwijk, L.P. van, 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions*. ISRIC (Netherlands) 1989, 194p. ISBN 90-6672-035-2
- Parikh, S.J., Goyne, K.W., Margenot, A.J., Mukome, F.N.D., Calderón, F.J., 2014. Soil Chemical Insights Provided through Vibrational Spectroscopy, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 1–148.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00001-8>
- Pouzet, D., 2002, Caractérisation chimique des sols Réunionnais : regroupement spatial homogène des données, 46p. CIRAD
- Ramarson, H., Razakamanarivo N., Grinand C., Razafindrakoto MA., Bernoux M. and Albrecht, A. 2011. Mapping organic carbon stocks in eucalyptus plantations of the central highlands of Madagascar: A multiple regression approach, *Geoderma*, 162, 335-346.
- Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. 438 p.
- Ridgeway, G., 1999. The state of boosting, *Computing Science and Statistics*, 31:172-181.
- Risoud, B., Theobald, O., 2002. Référentiel pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et son pouvoir de réchauffement global. Annexe au document « Analyse énergétique d'exploitations agricoles et pouvoir de réchauffement global. Méthode et résultats sur 140 fermes françaises. 43p.
- Sitaula, B.K., Hansen, S., Sitaula, J.I.B. and Bakken, L.R. 2000. Methane oxidation potentials and fluxes in agricultural soil: Effects of fertilisation and soil compaction. *Biogeochemistry* 48: 323.  
<https://doi.org/10.1023/A:1006262404600>
- STIPA, 1982. Notice pour l'entrée des descriptions et d'analyses de sol en banque de données. Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique STIPA, 2<sup>e</sup> édition, 1982. INRA, IRAT, 125p. Annexes.
- Thévenot A., Vigne M., Vayssières J., 2011. Référentiel pour l'analyse énergétique et l'analyse du pouvoir de réchauffement global des exploitations d'élevage à La Réunion, rapport technique CIRAD, FRCA, ADEME, 33 p.
- Thuriès, L., Moussard, G., Gauvin, M.-F., Feder, F., Doelsch, E., Légier, P., 2013. Organic status of tropical soils predicted by near infrared spectroscopy: Réunion Island as a case study. In: ICNIR (Ed.), NIR 2013 - 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy, La Grande Motte, France.
- Tosser, V., Eglin, T., Bardy, M., Besson, A., 2014. Application de la méthodologie Tier 1 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) aux sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS). *Etude et Gestion des Sols* 18.
- Van Dillewijn, C., 1960, Botanique de la canne à sucre vol. I, Centres techniques de la canne et du sucre de la Guadeloupe et de la Martinique, Wageningen Hollande Ed., 391p.



# Liste des publications du projet

## Articles

Allo M., Todoroff P., Jameux M., Stern M., Albrecht A. SOC stocks of tropical volcanic soils: predictions with near- and mid- infrared spectroscopy. Article en cours de soumission à *Geoderma* (fin mars 2019)

## Communications dans congrès

Allo.M., Albrecht A., Legier P., Goge F., Jameux M., Thuriès L. and Todoroff P., 2017. Long-term diachronic series for soil carbon saturation evidence. A case study on volcanic soils of Reunion island under sugarcane crops. 25<sup>th</sup> Pedometrics conference, Wageningen (The Netherlands), 26 June-1 July 2017. In Abstract Book Pedometrics 2017. Wageningen University and Research Centre, ISRIC, 19-19.

Allo, M., Albrecht, A., Todoroff, P., 2018. High SOC stocks under sugarcane crops on volcanic soils of Reunion island. 3<sup>rd</sup> ISSCT Agricultural Engineering, Agronomy and Extension Workshop, 23-28 September 2018, Saint-Denis (La Réunion, France).

Ramos, M., Albrecht, A., Bravin, M., Marion, D., Todoroff, P., Versini, A., Thuriès, L., 2018. Soil spectral signatures for sugarcane fertilization recommendations through an adapted soil typology. 3<sup>rd</sup> ISSCT Agricultural Engineering, Agronomy and Extension Workshop, 23-28 September 2018, Saint-Denis (La Réunion, France).

Allo, M., Todoroff, P., Jameux, M., Stern, M., Rosiès, B., Ramos, M., Quero, S., Albrecht, A., 2018. Beyond infrared spectroscopy and spatial analysis: SOC stocks mapping in volcanic soils of Reunion island. 21<sup>st</sup> World Congress of Soil Science. 12-17 august 2018, Rio (Brazil).

Allo M., Todoroff P., Jameux M., Stern M., Ramos M., Quero S. and Albrecht A., 2017. Quick assessment of soil organic carbon stocks for scaling up issues, using infrared spectroscopy on volcanic soils. 4<sup>th</sup> Climate Smart Agriculture conference, Johannesburg, (South Africa), 28-30 November 2017.

## Rapports de stages de fin d'études

Soutif-Bellanger, 2018. Variabilité spatiale et temporelle des émissions de N<sub>2</sub>O suite à l'apport de produits résiduels organiques en plantation de canne à sucre à la Réunion dans le cadre du projet ADEME C@RUN. AgroParisTech, 64p. Mémoire de stage de césure.

Ramos Marion, 2017. Impacts des systèmes maraichers sur les stocks en carbone des sols réunionnais. Bordeaux Sciences Agro, 72 p. Mémoire de Master 2 « Sciences de la terre, environnement, écologie ».

Quero Solène, 2017. Evaluation des stocks en carbone des sols agricoles réunionnais par spectroscopie moyen infra-rouge (MIR). Mesures in-situ et construction de modèles de prédictions. ENSAIA, 37 p. Mémoire d'ingénieur.

Doris Samuel, 2017. Conception et optimisation d'une méthode d'acquisition de signatures spectrales de sols réunionnais dans le domaine du moyen infrarouge. Université de La Réunion, 40p. Mémoire de DUT génie biologique.

Rosies Blandine, 2016. Pratiques agricoles et longévité des plantations de canne à sucre à La Réunion, quelles interactions avec les stocks de carbone des sols ? AgroParisTech, 64 p. Mémoire de Master 1 « Agrosociétés, Environnement, Paysages, Territoires et Forêts ».

Stern Mathilde, 2016. Evaluation par spectroscopie infra-rouge des stocks en carbone des sols agricoles réunionnais. Mesures in situ et construction de modèles de prédictions. Université de Strasbourg, 98 p. Mémoire de Master 2 « Géographie Environnementale ».

## Annexe 1 : Les différentes classifications de sol utilisées

### Codification des unités de milieu morphopédologique en domaines pédogénétiques (codes STIPA)

Code STIPA (1982)	Unité morphopédologique (Raunet, 1991)	Localisation (km)	Code STIPA (1982)	Unité morphopédologique (Raunet, 1991)	Localisation (km)
Inculté	1, 2, 3, 4, 27, 60, 61, 66, 67, 76, 77, 78, 79, 84, 88, 90, 91, et >93		2230B	82	$X \geq 160$
1130	92 et 93		42AA	32, 33 et 46	
2420	82	$X < 160$	42AB	40, 41, 42, 43 et 54	
	83			52	$X \geq 165$
2430	5			59	$X \geq 170$
3100	24, 25 et 26		42B	34, 35, 37, 38, 39, 47, 48, 49, 50, 74 et 75	
7113	72 et 73	$Y \geq 51.8$	42CA	36	
	72	$39 < Y < 42$	42CB	55, 56, 57, 58 et 87	
7410	13, 19 et 20		42NP	72	$Y < 46.6$ et $X > 159$
7414	14, 15, 18, 21, 22 et 23		7113A	28 et 29	
101A	30 et 31		7113B	53	
101B	17			59	$X < 170$
101C	80	$Y \leq 70$	7113C	68, 69, 70, et 71	$Y \geq 51.8$
101D	80	$Y > 70$	7115A	10	
103A	6, 7, 8, 9 et 45		7115B	11, 12, 81 et 89	
	16	$X < 165$	7410A	44, 51	
103B	16	$X \geq 165$		52	$X < 165$
1132N	85		74CIL	68, 69, 70 et 71	$Y < 51.8$
1132S	86	$Y < 40$		72	$42 < Y < 51.8$
1132W	86	$Y \geq 40$		73	$Y < 51.8$

### Définition des unités sol à partir des domaines pédogénétiques

Unité de sol	Domaine pédogénétique
Ferrallitique	101A, 101B, 103A et 103B
Vertique	7115B
Brun	2420, 7414, 7410, 3100, 1130, 7115A, 7410A, 711C, 1132S, 1132W et 74CIL
Brun andique	7113, 101D, 1132N, 7113A, 7113B et 7113C
Andique non perhydraté	42NP, 42AA, 42AB, 101C et 2430
Andique (ou andique perhydraté)	42P, 42CA, 42B, 42CB, 2230B et 2230A

D'après Pouzet, D., 2002, Caractérisation chimique des sols Réunionnais : regroupement spatial homogène des données, 46p. CIRAD



## Annexe 2 : Modèles de prédiction du stock de carbone du sol en spectroscopie infrarouge

Précision des modèles de prédiction de la teneur en carbone, de la densité apparente et du stock de carbone du sol par spectroscopie en moyen infrarouge, visible et proche infrarouge, au champ ou en laboratoire.

MIR lab	Pre-processing	Descriptive statistics					Calibration			Cross Validation								
		N	Mean	SD	Q1	Q3	R <sup>2</sup>	RMSE	slope	R <sup>2</sup>	RMSE <sub>cv</sub>	slope	SECV	bias	SEPc	PCs	RPD	RPIQ
<b>SOC (gC kg<sup>-1</sup>)</b>																		
700-4000cm <sup>-1</sup>	No	94	36.17	28.32	16.17	55.68	0.95	6.10	0.95	0.90	8.98	0.91	9.03	-0.09	9.03	7	3.15	4.38
700-4000cm <sup>-1</sup>	SNV	93	36.12	29.01	16.16	55.54	0.97	5.20	0.97	0.95	6.67	0.95	6.70	0.20	6.70	9	4.35	5.88
700-4000cm <sup>-1</sup>	D2	92	36.07	28.69	16.12	55.59	0.96	5.75	0.96	0.88	10.03	0.89	10.07	-0.44	10.07	6	2.86	3.92
<b>BD (g cm<sup>-3</sup>)</b>																		
700-4000cm <sup>-1</sup>	No	92	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.84	0.10	0.85	0.10	0.00	0.10	4	2.49	4.14
700-4000cm <sup>-1</sup>	SNV	93	0.96	0.25	0.76	1.17	0.85	0.10	0.85	0.82	0.11	0.83	0.11	0.00	0.11	3	2.27	3.75
700-4000cm <sup>-1</sup>	D2	92	0.96	0.25	0.75	1.17	0.90	0.08	0.90	0.82	0.11	0.83	0.11	0.00	0.11	4	2.26	3.87
<b>SOC Stocks (KgC m<sup>-2</sup>)</b>																		
700-4000cm <sup>-1</sup>	No	94	2.65	1.75	1.38	3.27	0.92	0.48	0.92	0.81	0.73	0.84	0.74	0.06	0.73	7	2.39	2.56
700-4000cm <sup>-1</sup>	SNV	94	2.62	1.66	1.38	3.27	0.89	0.56	0.89	0.81	0.73	0.85	0.73	0.18	0.73	7	2.28	2.57
700-4000cm <sup>-1</sup>	D2	92	2.53	1.55	1.38	3.15	0.85	0.59	0.85	0.80	0.69	0.79	0.69	0.14	0.69	3	2.24	2.55
<b>vis-NIR field</b>																		
<b>SOC (gC kg<sup>-1</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	92	36.03	28.72	16.12	55.59	0.94	6.73	0.94	0.91	8.51	0.94	8.56	-0.04	8.53	9	3.37	4.61
350-2500 nm	D D1	93	35.65	28.02	16.16	55.40	0.94	6.65	0.94	0.90	8.57	0.92	8.61	-0.04	8.59	7	3.27	4.56
350-2500 nm	SNV D1	93	35.26	27.07	16.16	55.54	0.96	5.51	0.86	0.93	7.34	0.94	7.38	-0.10	7.37	9	3.69	5.34
<b>BD (g cm<sup>-3</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	94	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.83	0.11	0.85	0.11	0.00	0.11	7	2.31	3.93
350-2500 nm	D D1	91	0.96	0.25	0.77	1.17	0.87	0.09	0.87	0.85	0.10	0.87	0.10	0.00	0.10	3	2.45	4.21
350-2500 nm	SNV D1	92	0.95	0.26	0.75	1.17	0.89	0.09	0.89	0.84	0.10	0.87	0.10	0.00	0.10	6	2.56	4.14
<b>SOC Stocks (KgC m<sup>-2</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	93	2.62	1.67	1.38	3.28	0.97	0.31	0.97	0.89	0.55	0.94	0.55	0.01	0.54	15	3.06	3.47
350-2500 nm	D D1	91	2.62	1.69	1.38	3.31	0.92	0.49	0.92	0.86	0.63	0.89	0.63	-0.09	0.63	7	2.68	3.04
350-2500 nm	SNV D1	91	2.62	1.68	1.39	3.26	0.96	0.34	0.96	0.91	0.51	0.93	0.51	-0.10	0.51	12	3.32	3.68
<b>vis-NIR lab</b>																		
<b>SOC (gC kg<sup>-1</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	92	36.15	28.49	16.12	55.77	0.95	6.05	0.95	0.92	7.98	0.94	8.02	0.08	8.00	9	3.57	4.94
350-2500 nm	D D1	92	36.58	28.46	16.19	55.77	0.96	5.42	0.96	0.94	6.96	0.93	7.00	-0.02	6.99	7	4.09	5.65
350-2500 nm	SNV D1	94	36.17	28.32	16.17	55.68	0.96	5.77	0.96	0.92	8.04	0.94	8.08	0.02	8.05	9	3.52	4.89
<b>BD (g cm<sup>-3</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	94	0.95	0.25	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.81	0.11	0.84	0.11	0.00	0.11	9	2.31	3.82
350-2500 nm	D D1	94	0.95	0.26	0.75	1.17	0.87	0.09	0.87	0.82	0.11	0.86	0.11	0.00	0.11	5	2.32	3.82
350-2500 nm	SNV D1	93	0.96	0.25	0.76	1.17	0.87	0.09	0.87	0.81	0.11	0.84	0.11	0.00	0.11	6	2.27	3.75
<b>SOC Stocks (KgC m<sup>-2</sup>)</b>																		
350-2500 nm	No	93	2.64	1.67	1.39	3.28	0.89	0.54	0.89	0.83	0.69	0.86	0.70	0.05	0.69	9	2.40	2.71
350-2500 nm	D D1	93	2.64	1.67	1.39	3.28	0.91	0.49	0.91	0.87	0.61	0.88	0.61	-0.08	0.61	7	2.73	3.08
350-2500 nm	SNV D1	94	2.62	1.66	1.38	3.27	0.92	0.48	0.92	0.86	0.62	0.89	0.63	-0.01	0.62	9	2.67	3.01

## Annexe 3 : Exemple de calendrier de prélèvements

(2<sup>ème</sup> campagne, sur nitisol)

Type tubes	n° boîte	Date	traitement	Temps	n° échantillons	Observation			
Old= exetainers	1	14/11/2016	LP2	J+0	54				
		15/11/2016	LP2	J+1	46				
	2	16/11/2016	LP2	J+2	8				
		17/11/2016	LP2	J+3	54				
	3	21/11/2016	LP2	J+7	38				
		22/11/2016	BA2	J+0	16				
	4	28/11/2016	LP2	J+14	54				
		29/11/2016	BA2	J+7	30				
	5	01/12/2016	T2	J+0	27				
		08/12/2016	BA2	J+16	58				
	6	13/12/2016	LP2	J+29	41				
		14/12/2016	T2	J+13	17				
	7	21/12/2016	BA2	J+29	58				
		22/12/2016	T2	J+28	25				
	8	03/01/2017	LP2	J+50	33				
		22/02/2017	LP2	J+99	58				
	9				9				
					49				
					6	Pour test de comparaison avec nouveaux tubes			
New = Perkin	10	04/01/2017	BA2	J+43	58				
		11/01/2017	T2	J+48	42				
	11	16/01/2017	LP2	J+63	16	Attention 2x 53 t30 et 53 t60			
		20/01/2017	BA2	J+59	58				
	12	25/01/2017	T2	J+62	26				
		31/01/2017	LP2	J+78	32				
	13	02/02/2017	BA2	J+72	58	Attention 2x 3t0 3t30 et 3t60			
		16/02/2017	T2	J+84	10				
	14	22/02/2017	LP2	J+63	48				
		24/02/2017	BA2	J+94	52				
	15				5				
					58				
					2	Pour test cire			





## Annexe 4 : Exemple de calendrier de prélèvements

(3<sup>ème</sup> campagne, sur andosol)

Nota : avec 2 modalités, les prélèvements sont réalisés quasiment tous les jours pendant les 2 premières semaines. Il arrive même que 2 séries de prélèvements doivent être réalisées le même jour. Les aléas climatiques (cyclone) ou de culture (traitements phytosanitaires non prévus) peuvent impacter le calendrier théorique.

12-oct	mise en place des embases	urée	lisier	
vendredi 20 octobre 2017	Prélèvement lisier + <b>préparation matériel</b>		J-7	
dimanche 22 octobre 2017				
lundi 23 octobre 2017	Prélèvement urée	J-7		
lundi 30 octobre 2017	Bassines, lisier embases, prélèvement lisier, <b>préparation matériel</b>		J0 embase	
mardi 31 octobre 2017	Prélèvement lisier + <b>préparation matériel (pour 1 et 2)</b>		J+1	
mercredi 1 novembre 2017	Prélèvement lisier		J+2	
jeudi 2 novembre 2017	Prélèvement lisier + <b>préparation matériel</b>		J+3	
vendredi 3 novembre 2017	Prélèvement lisier + <b>préparation matériel</b>		J+4	
lundi 6 novembre 2017	Prélèvement <b>urée + lisier + préparation matériel</b>	embase J0	J+7	
mardi 7 novembre 2017	Prélèvement urée + <b>préparation matériel</b>	J+1		
mercredi 8 novembre 2017	Prélèvement urée <b>annulé + préparation matériel</b>	J+2		
jeudi 9 novembre 2017	Prélèvement urée + <b>préparation matériel</b>	J+3		
vendredi 10 novembre 2017	Prélèvement urée <b>annulé + préparation matériel</b>	J+4		
lundi 13 novembre 2017	Prélèvement urée + <b>préparation matériel</b>	J+7		
mardi 14 novembre 2017	Prélèvement lisier		J+15	
lundi 20 novembre 2017	Prélèvement lisier + <b>préparation matériel</b>		J+21	
mardi 21 novembre 2017	Prélèvement urée	J+15		
lundi 27 novembre 2017	Prélèvement urée + <b>préparation matériel</b>	J+21		
mardi 28 novembre 2017	Prélèvement lisier		J+29	
mardi 5 décembre 2017	Prélèvement urée	J+29		
vendredi 15 décembre 2017	Prélèvement lisier J+46		J+46	
vendredi 22 décembre 2017	Prélèvement urée J+46	J+46		
mardi 9 janvier 2018	prélèvement lisier J+71		J+71	
mardi 16 janvier 2018	Prélèvement urée J+71	J+71		
lundi 22 janvier 2018	Retour métropole Myriam SB			
mardi 13 février 2018	lisier J106		J+106	
mardi 20 février 2018	urée J106	J+106		
mardi 20 mars 2018	lisier j141	cannes versées; impossible de prélever		
mardi 27 mars 2018	urée j141	cannes versées; impossible de prélever		

## Annexe 5 : Optimisation des temps de prélèvements

(effectués à 2 personnes, pour une parcelle instrumentée avec 18 enceintes)

Nota : toutes les enceintes peuvent être échantillonnées à 0, 30 et 60 minutes. Deux enceintes peuvent être échantillonnées à 2 temps supplémentaires (15 et 15 minutes), ce qui permet de construire les courbes d'accumulation des GES sur 5 points au lieu de 3.

position enceintes	a 1	b 2	c 3	a 4	b 5	c 6
temps (min)	00:00:00	00:03:00	00:06:00	00:09:00	00:12:00	00:15:00
					00:27:00	
	00:30:00	00:33:00	00:36:00	00:39:00	00:42:00	00:45:00
					00:57:00	
	01:00:00	01:03:00	01:06:00	01:09:00	01:12:00	01:15:00
2eme personne en vert						
	a 7	b 8	c 9	a 10	b 11	c 12
	00:18:00	00:21:00	00:24:00	00:00:00	00:03:00	00:06:00
	00:48:00	00:51:00	00:54:00	00:30:00	00:33:00	00:36:00
	01:18:00	01:21:00	01:24:00	01:00:00	01:03:00	01:06:00
	a 13	b 14	c 15	a 16	b 17	c 18
	00:09:00	00:12:00	00:15:00	00:18:00	00:21:00	00:24:00
		00:27:00				
	00:39:00	00:42:00	00:45:00	00:48:00	00:51:00	00:54:00
		00:57:00				
	01:09:00	01:12:00	01:15:00	01:18:00	01:21:00	01:24:00



## Annexe 6 : Stocks et différences de stocks de carbone du sol selon les modes d'usages autre que canne à sucre pour l'ensemble des unités pédoclimatiques

Cluster Sol Mir	Climat	Sol	Usage alternatif	stockC canne	stockC alternative	delta_stockC_mean	Var /Canne	delta_stockC_sd	n	pvalue
Tropical Dry_A1	Tropical Dry	A1	arboriculture	119	132	14	12%	65	3	0,7482
Tropical Dry_A1	Tropical Dry	A1	maraichage	169	189	21	12%	11	2	0,2329
Tropical Dry_A2	Tropical Dry	A2	maraichage	152	124	-28	-18%	42	5	0,2199
Tropical Dry_AG	Tropical Dry	AG	prairie	162	203	41	25%	27	3	0,1180
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	ananas	81	67	-14	-18%	25	8	0,1546
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	maraichage	71	59	-12	-17%	22	6	0,2406
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	prairie	80	100	20	26%	17	5	0,0511
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	maraichage	103	76	-27	-26%	18	14	0,0001
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	ananas	68	80	13	19%	23	5	0,2850
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	prairie	107	159	53	49%	91	3	0,4237
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	maraichage	74	68	-7	-9%	17	16	0,1342
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	ananas	70	69	0	-1%	23	9	0,9553
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	arboriculture	93	116	23	25%	39	12	0,0588
Tropical Dry_HV	Tropical Dry	HV	arboriculture	131	64	-67	-51%	69	20	0,0004
Tropical Dry_HV	Tropical Dry	HV	maraichage	86	46	-40	-46%	22	31	0,0000
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	arboriculture	58	34	-24	-42%	17	5	0,0334
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	ananas	74	65	-10	-13%	8	2	0,3353
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	maraichage	51	56	4	9%	61	4	0,8954
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	maraichage	171	157	-14	-8%	71	15	0,4622
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	arboriculture	115	101	-14	-12%	44	12	0,3089
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	ananas	122	118	-5	-4%	42	6	0,8010
Tropical Moist_A2	Tropical Moist	A2	arboriculture	153	127	-26	-17%	46	20	0,0209
Tropical Moist_A2	Tropical Moist	A2	maraichage	190	194	4	2%	57	4	0,8999
Tropical Moist_AA	Tropical Moist	AA	arboriculture	155	136	-19	-12%	106	4	0,7411
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	ananas	132	99	-33	-25%	30	6	0,0430
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	maraichage	176	164	-13	-7%	44	13	0,3171
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	arboriculture	145	139	-6	-4%	37	16	0,5114
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	maraichage	123	97	-25	-21%	40	9	0,0958
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	ananas	146	122	-24	-17%	30	9	0,0378
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	arboriculture	134	112	-23	-17%	49	14	0,1076
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	ananas	119	97	-22	-19%	40	15	0,0490
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	arboriculture	114	92	-22	-19%	54	12	0,1877
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	maraichage	157	161	4	3%	63	7	0,8645
Tropical Moist_HF	Tropical Moist	HF	arboriculture	155	98	-57	-37%	43	2	0,3083
Tropical Moist_HF	Tropical Moist	HF	maraichage	145	111	-34	-24%	24	4	0,0621
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	arboriculture	87	62	-25	-29%	18	4	0,0698
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	maraichage	95	84	-11	-11%	13	3	0,3046
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	ananas	106	96	-10	-9%	37	28	0,1767
Tropical Moist_HH	Tropical Moist	HH	ananas	77	62	-14	-19%	23	4	0,2975
Tropical Moist_HV	Tropical Moist	HV	ananas	82	65	-17	-21%	31	8	0,1708
Tropical Moist_PA	Tropical Moist	PA	maraichage	82	96	14	17%	29	3	0,5005
Tropical Moist_PA	Tropical Moist	PA	arboriculture	54	89	36	66%	43	3	0,2896
Tropical Wet_A1	Tropical Wet	A1	arboriculture	172	140	-33	-19%	55	5	0,2567
Tropical Wet_A1	Tropical Wet	A1	ananas	176	166	-10	-6%	41	3	0,7043
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	ananas	216	159	-57	-27%	55	42	0,0000
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	maraichage	174	117	-57	-33%	70	4	0,2028
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	arboriculture	182	196	14	8%	83	12	0,5739
Tropical Wet_AA	Tropical Wet	AA	arboriculture	196	109	-87	-45%	63	2	0,3013
Tropical Wet_AG	Tropical Wet	AG	ananas	238	199	-39	-16%	60	36	0,0004
Tropical Wet_AG	Tropical Wet	AG	arboriculture	271	239	-32	-12%	86	7	0,3672
Tropical Wet_GA	Tropical Wet	GA	ananas	123	100	-23	-19%	31	7	0,1002
Tropical Wet_GA	Tropical Wet	GA	arboriculture	102	88	-13	-13%	27	3	0,4817
Tropical Wet_GH	Tropical Wet	GH	ananas	105	117	11	11%	18	3	0,3873
Tropical Wet_PA	Tropical Wet	PA	ananas	92	79	-13	-14%	10	2	0,3214

Cluster Sol Mir	Climat	Sol	Usage alternatif	stockC canne	stockC alternative	delta_stockC_mean	Var /Canne	delta_stockC_sd	n	pvalue
Tropical Dry_A1	Tropical Dry	A1	arboriculture	119	132	14	12%	65	3	0,7482
Tropical Dry_A1	Tropical Dry	A1	maraichage	169	189	21	12%	11	2	0,2329
Tropical Dry_A2	Tropical Dry	A2	maraichage	152	124	-28	-18%	42	5	0,2199
Tropical Dry_AG	Tropical Dry	AG	prairie	162	203	41	25%	27	3	0,1180
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	ananas	81	67	-14	-18%	25	8	0,1546
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	maraichage	71	59	-12	-17%	22	6	0,2406
Tropical Dry_HF	Tropical Dry	HF	prairie	80	100	20	26%	17	5	0,0511
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	maraichage	103	76	-27	-26%	18	14	0,0001
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	ananas	68	80	13	19%	23	5	0,2850
Tropical Dry_HG	Tropical Dry	HG	prairie	107	159	53	49%	91	3	0,4237
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	maraichage	74	68	-7	-9%	17	16	0,1342
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	ananas	70	69	0	-1%	23	9	0,9553
Tropical Dry_HH	Tropical Dry	HH	arboriculture	93	116	23	25%	39	12	0,0588
Tropical Dry_HV	Tropical Dry	HV	arboriculture	131	64	-67	-51%	69	20	0,0004
Tropical Dry_HV	Tropical Dry	HV	maraichage	86	46	-40	-46%	22	31	0,0000
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	arboriculture	58	34	-24	-42%	17	5	0,0334
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	ananas	74	65	-10	-13%	8	2	0,3353
Tropical Dry_PA	Tropical Dry	PA	maraichage	51	56	4	9%	61	4	0,8954
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	maraichage	171	157	-14	-8%	71	15	0,4622
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	arboriculture	115	101	-14	-12%	44	12	0,3089
Tropical Moist_A1	Tropical Moist	A1	ananas	122	118	-5	-4%	42	6	0,8010
Tropical Moist_A2	Tropical Moist	A2	arboriculture	153	127	-26	-17%	46	20	0,0209
Tropical Moist_A2	Tropical Moist	A2	maraichage	190	194	4	2%	57	4	0,8999
Tropical Moist_AA	Tropical Moist	AA	arboriculture	155	136	-19	-12%	106	4	0,7411
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	ananas	132	99	-33	-25%	30	6	0,0430
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	maraichage	176	164	-13	-7%	44	13	0,3171
Tropical Moist_AG	Tropical Moist	AG	arboriculture	145	139	-6	-4%	37	16	0,5114
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	maraichage	123	97	-25	-21%	40	9	0,0958
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	ananas	146	122	-24	-17%	30	9	0,0378
Tropical Moist_GA	Tropical Moist	GA	arboriculture	134	112	-23	-17%	49	14	0,1076
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	ananas	119	97	-22	-19%	40	15	0,0490
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	arboriculture	114	92	-22	-19%	54	12	0,1877
Tropical Moist_GH	Tropical Moist	GH	maraichage	157	161	4	3%	63	7	0,8645
Tropical Moist_HF	Tropical Moist	HF	arboriculture	155	98	-57	-37%	43	2	0,3083
Tropical Moist_HF	Tropical Moist	HF	maraichage	145	111	-34	-24%	24	4	0,0621
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	arboriculture	87	62	-25	-29%	18	4	0,0698
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	maraichage	95	84	-11	-11%	13	3	0,3046
Tropical Moist_HG	Tropical Moist	HG	ananas	106	96	-10	-9%	37	28	0,1767
Tropical Moist_HH	Tropical Moist	HH	ananas	77	62	-14	-19%	23	4	0,2975
Tropical Moist_HV	Tropical Moist	HV	ananas	82	65	-17	-21%	31	8	0,1708
Tropical Moist_PA	Tropical Moist	PA	maraichage	82	96	14	17%	29	3	0,5005
Tropical Moist_PA	Tropical Moist	PA	arboriculture	54	89	36	66%	43	3	0,2896
Tropical Wet_A1	Tropical Wet	A1	arboriculture	172	140	-33	-19%	55	5	0,2567
Tropical Wet_A1	Tropical Wet	A1	ananas	176	166	-10	-6%	41	3	0,7043
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	ananas	216	159	-57	-27%	55	42	0,0000
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	maraichage	174	117	-57	-33%	70	4	0,2028
Tropical Wet_A2	Tropical Wet	A2	arboriculture	182	196	14	8%	83	12	0,5739
Tropical Wet_AA	Tropical Wet	AA	arboriculture	196	109	-87	-45%	63	2	0,3013
Tropical Wet_AG	Tropical Wet	AG	ananas	238	199	-39	-16%	60	36	0,0004
Tropical Wet_AG	Tropical Wet	AG	arboriculture	271	239	-32	-12%	86	7	0,3672
Tropical Wet_GA	Tropical Wet	GA	ananas	123	100	-23	-19%	31	7	0,1002
Tropical Wet_GA	Tropical Wet	GA	arboriculture	102	88	-13	-13%	27	3	0,4817
Tropical Wet_GH	Tropical Wet	GH	ananas	105	117	11	11%	18	3	0,3873
Tropical Wet_PA	Tropical Wet	PA	ananas	92	79	-13	-14%	10	2	0,3214



## Annexe 7 : Paramétrage du calculateur Ex-ACT

### ONGLET Description

Chaque unité pédo-climatique est décrite selon la classification des types de sol et le climat définis dans l'outil Ex-Act.

Unité pédo-climatique	Type sol Ex-Act	Climat Ex-Act
A2_TM	Volcanic soils	Tropical Moist
A2_TW	Volcanic soils	Tropical Wet
AG_TM	Volcanic soils	Tropical Moist
AG_TW	Volcanic soils	Tropical Wet
GA_TM	Volcanic soils	Tropical Moist
GH_TM	LAC soils	Tropical Moist
HF_TD	LAC soils	Tropical Dry
HF_TM	LAC soils	Tropical Moist
HG_TD	LAC soils	Tropical Dry
HG_TM	LAC soils	Tropical Moist
HH_TD	LAC soils	Tropical Dry
HV_TD	HAC soils	Tropical Dry
PA_TD	LAC soils	Tropical Dry
Global	Volcanic soils	Tropical Moist

Les surfaces agricoles des 13 pédo-climats considérés dans Ex-Act représentent 69 % de la surface agricole totale de l'étude Figure 56.

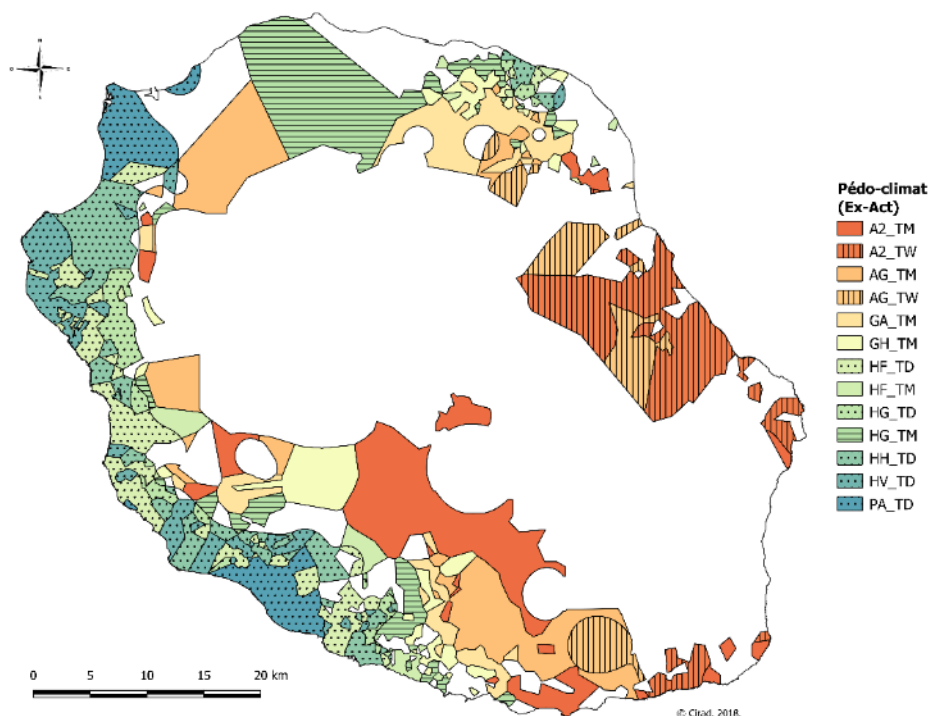


Figure 56 : Unités pédoclimatiques utilisées dans les simulations



## ONGLET Land Use Change

Pour chaque pédo-climat, les stocks moyens de la canne à sucre ont été calculés et les stocks moyens des autres usages ont été calculés par rapport à ceux de la canne à sucre selon la variation de stock estimée. Le stock de la canne à sucre a été affecté aux stocks des modes d'usages dont le stock moyen n'était pas significativement différent de celui de la canne à sucre. Les stocks sont exprimés en tC ha<sup>-1</sup>.

Unité pédo-climatique	Maraichage	Ananas	Arboriculture	Canne à sucre	Prairie
A2_TM			119.36	145.20	
A2_TW		131.34		188.70	
AG_TM		116.53		149.50	
AG_TW		164.09		203.20	
GA_TM	99.43	100.33		124.80	
GH_TM		90.53		112.60	
HF_TD				96.60	117.05
HF_TM	81.24			115.50	
HG_TD	65.12			91.80	
HG_TM			69.01	93.90	
HH_TD			102.55	79.10	
HV_TD	36.43		62.20	76.40	
PA_TD			51.63	76.00	

Les biomasses aériennes totales de l'ananas et du maraichage ont été évaluées à 10 tC/ha et 1 tC/ha respectivement, à dire d'expert. La valeur par défaut d'Ex-Act a été conservée pour l'arboriculture. Pour les prairies, la biomasse aérienne totale a été évaluée à partir de l'estimation de rendements des prairies et répartis selon la classe d'altitude des prairies du pédo-climat selon expertise.

Unité pédo-climatique	Rdts (tMS/ha)	Biomasse Ex-act (tC/ha)
A2_TM	12	<b>6</b>
A2_TW	25	<b>12</b>
AG_TM	12	<b>6</b>
AG_TW	25	<b>12</b>
GA_TM	25	<b>12</b>
GH_TM	25	<b>12</b>
HF_TD	25	<b>12</b>
HF_TM	25	<b>12</b>
HG_TD	25	<b>12</b>
HG_TM	25	<b>12</b>
HH_TD	25	<b>12</b>
HV_TD	25	<b>12</b>
PA_TD	25	<b>12</b>
Global	25	<b>12</b>

L'estimation de la biomasse totale de la canne à sucre a été réalisée en fonction de rendements moyens par terroir de canne à sucre. L'outil CompoBioCas (CIRAD) a permis d'estimer la biomasse totale (aérienne et racinaire) à partir des rendements moyens des unités pédo-climatiques. La teneur en carbone de la biomasse totale de la canne est estimée à 0.5 tC tMS<sup>-1</sup>.

Unité pédo-climatique	Rendement moyen MF en T/Ha	Biomasse totale MS en T/Ha	Biomasse Carbone Exact tC/ha
A2_TM	67.87	41.20	20.60
A2_TW	68.77	41.57	20.78



AG_TM	63.81	39.53	19.76
AG_TW	59.47	37.74	18.87
GA_TM	63.80	39.52	19.76
GH_TM	68.66	41.52	20.76
HF_TD	70.04	42.09	21.04
HF_TM	73.06	43.33	21.67
HG_TD	61.31	38.50	19.25
HG_TM	70.32	42.20	21.10
HH_TD	68.94	41.64	20.82
HV_TD	73.29	43.43	21.71
PA_TD	82.80	47.34	23.67
Global	67.65	41.11	20.55

Cependant, la couche d'information des terroirs de canne à sucre datant des années 1990, les rendements semblent être sous-estimés par rapport aux performances agronomiques actuelles de la filière.

### ONGLET cropland / grassland

Les surfaces, exprimées en hectare, sont issues de la carte d'occupation du sol 2017 de La Réunion (Dupuy, 2017).

Surface (ha)	Maraichage	Ananas	Arboriculture	Canne à sucre	Prairie	par PC
A2_TM	780.24	5.22	1162.51	919.09	1634.56	4501.63
A2_TW	85.66	55.73	483.96	3234.58	77.67	3937.60
AG_TM	420.27	33.25	953.45	1380.60	1156.17	3943.74
AG_TW	86.66	46.42	361.35	1216.84	148.49	1859.74
GA_TM	264.78	73.71	400.60	2123.58	142.32	3004.99
GH_TM	178.91	34.11	308.99	1617.42	140.00	2279.42
HF_TD	329.79	43.52	568.57	1776.40	153.40	2871.69
HF_TM	75.41	11.28	144.52	583.65	203.99	1018.84
HG_TD	200.90	17.32	315.72	988.50	123.13	1645.55
HG_TM	391.95	61.32	298.93	1873.67	209.86	2835.72
HH_TD	344.66	51.05	790.85	1239.60	103.90	2530.06
HV_TD	193.47	11.81	527.67	606.12	115.50	1454.57
PA_TD	129.05	6.32	302.50	452.01	194.06	1083.95
Global	<b>3481.77</b>	<b>451.06</b>	<b>6619.61</b>	<b>18012.04</b>	<b>4403.02</b>	<b>32967.50</b>

### ONGLET grassland Livestock

Les effectifs animaux ont été estimés et réévalués à partir du RGA, 2010 et géolocalisés grâce à une couche d'information géographique des bâtiments d'élevage (DAAF La Réunion, 2012). Pour chaque catégorie d'animaux, les effectifs de la commune ont été affectés aux bâtiments d'élevage. Chaque bâtiment comprend le même nombre d'animaux. Seuls les effectifs des vaches laitières sont disponibles et géolocalisés.

Bétail (nb têtes)	Vaches laitières	Autres bovins	Chèvres	Moutons	Suidés de marché (porcs)	Suidés de reproduction (truie)	Volailles (poulet+pp)
A2_TM	364	4197	2938	10	11039	1183	310625
A2_TW	0	320	803	54	1937	275	111051
AG_TM	315	2470	1197	0	6627	679	226624
AG_TW	44	532	308	0	4760	515	37695

GA_TM	20	298	784	0	3296	340	29043
GH_TM	63	392	549	0	448	41	65933
HF_TD	0	785	2995	0	2560	316	17220
HF_TM	0	994	0	0	490	54	0
HG_TD	17	269	621	10	2537	330	8551
HG_TM	0	186	1023	0	263	50	65372
HH_TD	0	407	594	0	2640	258	177344
HV_TD	0	216	4180	121	2298	222	41334
PA_TD	0	216	99	0	0	0	0
Global	823	11282	16091	195	38895	4263	1090792

Si les animaux élevés en bâtiment tels que les suidés et les volailles sont probablement bien répartis sur le territoire selon cette méthode, quelques limites doivent être soulignées pour les autres catégories. Les caprins et ovins ont été considérés comme étant élevés dans des bâtiments d'élevage. A La Réunion, les bovins allaitants en pâturage n'ont généralement pas ou peu de bâtiments qui leur sont dédiés, entraînant un biais de la répartition des effectifs « autres bovins » selon la méthode utilisée. Les équins n'ont pas été pris en compte dans nos calculs.

Les émissions de méthane liées à l'activité biologique du bétail ont été renseignées avec des valeurs issues du bilan Energie et GES à La Réunion (Thévenot et al., 2011).

Bétail	Fermentation entérique (kgCH <sub>4</sub> /animal/an)	Déjections (stockage, travail, apport) (kgCH <sub>4</sub> /animal/an)
Vaches laitières	106.44	13.83
Autres bovins	42.49	3.48
Chèvres	9.48	0.16
Moutons (valeur par défaut Ex-Act)	5	0.15
Suidés de marché	1.03	3.47
Suidés de reproduction	1.03	3.47
Volailles	0.07	0.56

Les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) du fumier ont également été renseignées avec les valeurs issues du bilan Energie et GES à La Réunion (Thévenot et al., 2011).

#### Facteur d'émission de N<sub>2</sub>O du fumier (kg N-N<sub>2</sub>O/kg N)

Pâturage, champs, enclos	0.03
Autre	0.03

### ONGLET inputs

#### 1. Canne à sucre

Les quantités d'intrants considérées pour la canne à sucre sont les intrants conseillés selon le système expert réunionnais d'aide à la fertilisation (SERDAF). Les modules de ce système expert ont été reconstitués pour définir le conseil sur le jeu de données ayant servi à la définition des unités pédologiques. Seul le conseil pour la repousse a été considéré, et moyenné sur une durée de plantation de 7 ans. Pour la fertilisation azotée, l'hypothèse a été faite que tout l'apport d'azote se fait sous forme uréique d'après expertise. Les données sont exprimées en t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

Unité pédo-climatique (PC)	Nombre	Urée (N)	P	K
A2_TM	29	0,243	0,076	0,290
A2_TW	77	0,244	0,104	0,314
AG_TM	44	0,292	0,110	0,322
AG_TW	21	0,286	0,111	0,306



GA_TM	61	0,331	0,111	0,306
GH_TM	54	0,324	0,099	0,248
HF_TD	84	0,318	0,050	0,187
HF_TM	20	0,299	0,027	0,141
HG_TD	34	0,319	0,100	0,198
HG_TM	62	0,320	0,099	0,215
HH_TD	59	0,322	0,096	0,183
HV_TD	41	0,329	0,084	0,243
PA_TD	32	0,333	0,057	0,189
Global (moyenne des PC)	618	0.305	0.087	0.242

Cependant, dans les pratiques, le conseil SERDAF n'est que très peu suivi et un cycle de plantation est de 10 ans en moyenne.

Pour le chaulage, le conseil SERDAF préconisant des quantités de Ca Mg ou Ca, l'apport de dolomie et calcaire a été théorisé afin de correspondre aux catégories Ex-Act bien que les pratiques des systèmes cannières réunionnais n'utilisent que très peu ce type de produit chaulant. De plus, à la Réunion, les apports en Ca et Mg ne se font qu'à la replantation (1 fois sur 7 ans) et dans la limite de 2t chaux (équivalent à 4.25 t de calcaire) et 4t de dolomie d'après le guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion (Fillols and Chabalier, 2007). Le conseil en produit chaulant a été considéré uniquement dans les cas où plus de 10% des analyses de sol étaient concernées par un conseil en chaulage. Aucun chaulage n'a été renseigné pour la méthodologie « Global ».

Unité pédo-climatique	Type de produit	Nombre d'analyses de sol	Dose de produit chaulant conseillé	Dose apportée à la replantation maximum	Dose apportée moyennée sur le cycle de culture (t/ha)
A2_TM	Dolomie	6	9.10	4	0.571
A2_TW	Calcaire	11	2.91	2.91	0.416
AG_TM	Dolomie	27	7.61	4	0.571
AG_TW	Calcaire	6	3.67	3.67	0.524
AG_TW	Dolomie	7	7.86	4	0.571
GA_TM	Dolomie	48	8.22	4	0.571
GH_TM	Calcaire	7	3.43	3.43	0.490
GH_TM	Dolomie	24	7.31	4	0.571
HG_TM	Calcaire	10	4.38	4.25	0.607
HG_TM	Dolomie	14	6.83	4	0.571

D'après (Martin et al., 2016), les herbicides apportés sur canne à sucre représentent 98% du poids des QSA (Quantité de Substance Active) herbicides de La Réunion. Les pesticides sur canne ont donc été considérés comme étant à 100% des herbicides. Selon cette hypothèse, les autres modes d'usages ne reçoivent aucun herbicide. La quantité totale d'herbicides estimées par (Martin et al., 2016) sur canne à sucre a été divisée uniformément sur la surface cannière et représente 5.90 kg de substance active par hectare et par an. Cependant, certaines quantités de substance active n'étant pas renseignées dans le document de Martin et al. (2016), ces types d'herbicides n'ont pas été pris en compte dans le calcul.

## 2. Ananas

Pour la culture de l'Ananas, les doses conseillées en NPK ont été considérées comme étant les quantités apportées. Les doses conseillées et les pratiques sont issues d'une fiche technique de l'ananas Victoria (CIRAD and Chambre d'agriculture Réunion, 2015), des conseils en fertilisation du logiciel Ferti-RUN (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008) et d'une étude des pratiques agricoles de la production d'Ananas (Fournier and Cambournac, 2013). Les doses conseillées sont de l'ordre de 300 kg N ha<sup>-1</sup> cycle<sup>-1</sup> et 450 kg K ha<sup>-1</sup> cycle<sup>-1</sup>. A La Réunion, selon Fournier and Cambournac (2013), la moitié des exploitants apporte un engrais binaire tandis que l'autre moitié des exploitants apporte l'azote sous forme d'urée et le potassium sous forme de sulfate de potasse. Cependant, bien que le cycle de l'ananas varie entre 12 et 18 mois selon l'altitude de la culture, le cycle a été considéré comme étant de 1 an sur l'ensemble de l'île.

Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage pour la culture de l'ananas, aucun chaulage n'a été renseigné.

Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide n'est apporté sur ananas à La Réunion. En effet, tous les herbicides sont considérés comme apportés en totalité sur canne à sucre, aucun insecticide n'est homologué pour l'ananas et seul 2-3% des fongicides totaux à La Réunion seraient appliqués sur ananas à dire d'expert.

Toutes les quantités d'intrants sont renseignées de manière identique pour tous les pédo-climats.

Intrants	ANANAS
Apport dolomie t ha-1 an-1	0
Apport calcaire t ha-1 an-1	0
Apport Urée t ha-1 an-1	0.123
Autre engrais N t ha-1 an-1	0.120
P2O5 t ha-1 an-1	0.025
K2O t ha-1 an-1	0.450
Boues tN ha-1	0
Compost tN ha-1	0.069
Autre chaulage t ha-1 an-1	0
Herbicides t matiere active an-1 ha-1	0
Insecticides t matiere active an-1 ha-1	0
Fongicides t matiere active an-1 ha-1	0

### 3. Maraichage

Pour le maraichage, étant donné la diversité des pratiques et des différences liées aux types de cultures, une méthodologie basée sur des doses conseillées ne semblait pas envisageable. Les quantités de fertilisants ont donc été déduits d'une enquête statistique de la DAAF auprès de 500 producteurs maraichers à La Réunion sur la culture des légumes (carotte, chou, salade, tomate) (DAAF La Réunion, 2016). Des doses moyennes apportées par cycle ont été prises en compte pour fertilisation minérale. Pour les apports organiques, seule la dose moyenne d'azote apportée de 65 kg N ha<sup>-1</sup> cycle<sup>-1</sup> étant indiquée, les doses de P et K ont été estimées à partir des caractéristiques agronomiques des matières organiques les plus utilisées (fumier de bovin, écumes de sucrerie et fumier de volailles de chair) (DAAF La Réunion, 2016) et de leur coefficient équivalent-engrais (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008). Afin de prendre en compte la rotation des cultures, deux cycles ont été considérés en moyenne sur une année (Chabalier et al., 2006). Etant donné que la pratique de chaulage sur le maraichage ne concerne que 4% des surfaces à La Réunion (DAAF La Réunion, 2016), l'hypothèse a été faite qu'aucun chaulage est réalisé sur les surfaces en maraichage de La Réunion.

Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun herbicide n'est apporté sur maraichage à La Réunion car apportés en totalité sur canne à sucre.

A dire d'expert, 70% en moyenne des insecticides et des fongicides vendus à La Réunion seraient appliqués sur maraichage. La répartition de l'utilisation des insecticides et fongicides sur maraichage a été estimé à 50% chacun, c'est-à-dire 1.59 kg de substance active par hectare et par an.

Toutes les quantités d'intrants sont renseignées de manière identique pour tous les pédo-climats.

Intrants	MARAICHAGE
Apport dolomie t ha-1 an-1	0
Apport calcaire t ha-1 an-1	0
Apport Urée t ha-1 an-1	0.000
Autre engrais N t ha-1 an-1	0.150
P2O5 t ha-1 an-1	0.644
K2O t ha-1 an-1	0.599
Boues tN ha-1	0.000
Compost tN ha-1	0.130
Autre chaulage t ha-1 an-1	0
Herbicides t matiere active an-1 ha-1	0
Insecticides t matiere active an-1 ha-1	0.00159





Fongicides t matière active an <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>	0.00159
---	---------

#### 4. Arboriculture

La fertilisation en NPK pour l'arboriculture a été raisonnée en fonction des doses conseillées en NPK pour la culture des agrumes uniquement (Chambre d'agriculture Réunion and CIRAD, 2008) ; les autres vergers (litchis et manguiers) ne recevant pas de fertilisation. Les surfaces d'agrumes étant différentes selon les pédo-climats, les apports en NPK ont été calculés pour chaque pédo-climat et ramenés à la surface totale de l'arboriculture du pédo-climat. Le même calcul a ensuite été appliqué aux surfaces globales des 13 pédo-climats pour la fiche « Global ».

Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage pour les vergers, aucun chaulage n'a été renseigné.

Unité pédo-climatique (PC)	N Autre engrais N t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	P P2O5 t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	K K2O t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>
A2_TM	0.419	0.098	0.419
A2_TW	0.069	0.016	0.069
AG_TM	0.439	0.102	0.439
AG_TW	0.393	0.092	0.393
GA_TM	0.398	0.093	0.398
GH_TM	0.423	0.099	0.423
HF_TD	0.140	0.033	0.140
HF_TM	0.392	0.092	0.392
HG_TD	0.342	0.080	0.342
HG_TM	0.337	0.079	0.337
HH_TD	0.196	0.046	0.196
HV_TD	0.074	0.017	0.074
PA_TD	0.050	0.012	0.050
Global	0.291	0.068	0.291

Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide n'est apporté sur arboriculture à La Réunion car apportés en totalité sur canne à sucre.

Selon expertise, 30 % en moyenne des insecticides et des fongicides vendus à La Réunion seraient appliqués sur arboriculture. La répartition de l'utilisation des insecticides et fongicides sur maraichage a été estimée à 90 et 10% respectivement, ce qui équivaut à 1.23 kg de substance active par hectare et par an pour les insecticides et 0.14 kg de substance active par hectare et par an pour les fongicides.

Toutes les quantités de pesticides sont renseignées de manière identique pour tous les pédo-climats.

#### 5. Prairie

Pour les prairies, les doses conseillées en NPK ont été considérées comme étant les quantités apportées. Le conseil utilisé est celui indiqué dans le guide technique des prairies à La Réunion (Barbet-Massin et al., 2004), soit 342 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, 235 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et 144 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ce conseil étant préconisé à la fois pour une prairie avec un rendement annuel de 12tMS ha<sup>-1</sup> (correspondant aux prairies des Hauts) ou une prairie de fauche (7/9 coupes par an) correspondant aux prairies des Bas, cela permet de ne pas différencier les prairies fauchées des Bas, cultivées principalement en Chloris et les prairies fauchées des Hauts qui regroupent des espèces tropicales et tempérées et dont les rendements sont inférieurs.

Cependant, la distinction a été faite entre les prairies de pâturage qui n'ont aucun amendement organique ou engrais chimique autres que les effluents des animaux.

Pour les prairies de fauche, deux cas particuliers ont été considérés d'après expertise. Pour le pédo-climat AG\_TM, aucune fertilisation n'est considérée. La répartition entre les engrais chimiques et les amendements organiques pour l'azote ne concerne que le pédo-climat A2\_TM dont la conduite des élevages laitiers de la zone permet de répartir les 342 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> entre 90 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> d'azote minéral et 252 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> d'azote apporté par du lisier de bovin.

Les surfaces de prairies pâturées et fauchées étant différentes selon les pédo-climats, les apports en NPK ont été calculés pour chaque pédo-climat et ramenés à la surface totale des prairies du pédo-climat. Le même calcul a ensuite été appliqué aux surfaces globales des 13 pédo-climats pour la fiche « Global ».

Unité pédo-climatique (PC)	<b>N min</b> Autre engrais N t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	<b>N org</b> Compost tN ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	<b>P</b> P2O5 t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	<b>K</b> K2O t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>
A2_TM	0.0502	0.0179	0.0469	0.0287
A2_TW	0.2532		0.1740	0.1066
AG_TM	0.0000		0.0475	0.0291
AG_TW	0.1359		0.0934	0.0572
GA_TM	0.1050		0.0721	0.0442
GH_TM	0.0664		0.0456	0.0280
HF_TD	0.2594		0.1782	0.1092
HF_TM	0.0455		0.0313	0.0192
HG_TD	0.1601		0.1100	0.0674
HG_TM	0.2000		0.1374	0.0842
HH_TD	0.2686		0.1845	0.1131
HV_TD	0.3161		0.2172	0.1331
PA_TD	0.3400		0.2336	0.1432
Global	0.1128		0.0775	0.0475

Cependant, dans la pratique, les doses conseillées ne sont probablement que très peu suivies. La fertilisation en NPK des prairies de fauche des Bas semble bien plus importante que les quantités indiquées dans nos calculs. Aucune information n'étant disponible à notre connaissance sur les pratiques de chaulage, aucun chaulage n'a été renseigné. Concernant les pesticides, l'hypothèse a été faite qu'aucun pesticide est apporté sur prairie à La Réunion.



## BIBLIOGRAPHIE

- Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A., Thomas, P., 2004. Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion.
- Chabalier, P.-F., van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. CIRAD.
- Chambre d'agriculture Réunion, CIRAD, R., 2008. Manuel de l'utilisateur Ferti-RUN 2008.
- CIRAD, R., Chambre d'agriculture Réunion, 2015. Fiche technique de l'Ananas.
- DAAF La Réunion, 2016. Agreste, numéro100. La culture des légumes : chou, carotte, salade, tomate. Premiers résultats de l'enquête statistique réalisée en 2014 auprès de 500 producteurs maraîchers à La Réunion.
- DAAF La Réunion, 2012. Elements descriptifs des exploitations agricoles - 06/2012 [WWW Document]. URL <http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/Telechargement-donnees-SIG> (accessed 3.1.19).
- Dupuy, S., 2017. Fiche complémentaire de la couche « Carte d'occupation du sol 2017 à la Réunion » 9.
- Fillols, E., Chabalier, P.-F., 2007. Guide de la fertilisation de la canne à sucre à La Réunion. CIRAD.
- Fournier, P., Cambournac, T., 2013. Bilan des exploitations enquêtées 60.
- Martin, J., Maillary, L., Dutripon, S., Chaulet, G., Antoir, J., Masson, J., 2016. AFPP – 23e CONFÉRENCE DU COLUMA JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES DIJON – 6, 7 ET 8 DÉCEMBRE 2016 L'IFT HERBICIDES CANNE A SUCRE A LA REUNION : LA BAISSSE SEMBLE AMORCEE 11.
- Thévenot A., Vigne M., Vayssières J., 2011. Référentiel pour l'analyse énergétique et l'analyse du pouvoir de réchauffement global des exploitations d'élevage à La Réunion, rapport technique CIRAD, FRCA, ADEME, 33 p.

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



# Séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation spatiale et potentiels d'atténuation du changement climatique

**Résumé** L'exploration et la fouille de données spatiales dans l'importante base de données d'analyses de sol de La Réunion (> 45 000 échantillons depuis plus de 20 ans) montrent une stabilité et une teneur très élevée des teneurs de carbone du sol sous prairie et culture de canne à sucre (jusqu'à 300 t/ha sur les 30 premiers cm de profondeur).

Nous avons utilisé le calculateur de bilan de carbone Ex-ACT pour évaluer l'impact des changements d'usages agricoles des sols sur les stocks de carbone. Pour cela nous avons stratifié le territoire en unités pédologiques homogènes à partir de la signature spectrale en moyen infrarouge des échantillons de sol.

Des analyses de minéraux amorphes (allophanes) ont montré par ailleurs que ceux-ci constituent un proxy de la densité apparente des sols volcaniques ( $D_a=0.4$  dans des andosols perhydratés à 1.2 dans des sols ferralitiques). C'est ainsi grâce à la présence des minéraux amorphes, quantifiables par spectroscopie infrarouge, et la grande quantité d'échantillons de sols conservés en pédothèque, que nous avons pu estimer les stocks de carbone des unités de sol selon divers modes d'usage. Au total, les sols agricoles de La Réunion renferment un stock de 6.8 millions de tonnes de carbone sur 0-30cm de profondeur pour une surface de 47 585 ha.

L'outil Ex-ACT a permis d'évaluer les bilans GES pour un petit territoire comme La Réunion où la diversité des sols, des climats, des usages est importante, à condition de renseigner les facteurs d'émission avec des valeurs de niveau Tier 2. Le total annuel d'émissions de GES de 276 879 tCO<sub>2</sub>eq. Trois des scénarios simulés sont « sources de carbone » en raison, majoritairement, d'une augmentation des surfaces de maraîchage, ananas au détriment de la canne à sucre. Trois scénarios sont « puits de carbone », grâce à la diminution des intrants dans le scénario 'augmentation des surfaces en prairies', à l'augmentation de la biomasse aérienne dans le scénario 'maraîchage et arboriculture', et les pratiques conservatrices du scénario 'monoculture canne à sucre'.

## Essentiel à retenir

*Une méthode pour évaluer l'impact des changements d'usage des sols agricoles sur les stocks de carbone du sol, à l'échelle d'un territoire, dans un milieu physique très hétérogène, grâce à la spectroscopie infrarouge, une analyse spatiale d'une base de données d'analyses de sol, et un calculateur de bilan carbone ex-ante.*

